

**DIE ROLLE VON REIBUNG UND WÄRMELEITUNG
IN DER ENTWICKLUNG
DER KINETISCHEN GASTHEORIE**

Disbui. München
1988

Stefan L. Wolff



**Die Rolle von Reibung und Wärmeleitung
in der Entwicklung
der kinetischen Gastheorie**

**Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der
Fakultät der Mathematik
der
Ludwig-Maximilians-Universität München**

**vorgelegt von
Stefan L. Wolff
aus Berlin**

eingereicht am 25. Mai 1988

1. Berichterstatter: Prof. Dr. I. Schneider

2. Berichterstatter: Prof. Dr. G. Süßmann

Tag der mündlichen Prüfung: 20. September 1988

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Ivo Schneider für die engagierte wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und die vielen anregenden Diskussionen.

In den folgenden Archiven konnte ich Unterlagen einsehen. Ich danke den Mitarbeitern für ihre freundliche Unterstützung.

Archiv der Humboldt Universität Berlin (Abkürzung: UA der HUB)

Handschriftenabteilung der Staatsbibliothek Preussischer Kulturbesitz Berlin-West (Abkürzung: STPK)

Handschriftenabteilung der Bayerischen Staatsbibliothek München (Abkürzung: BSB)

Sammlung des Deutschen Museums München

Archiv des Siemens Museums München

Archive du Bas-Rhin Straßburg (Abkürzung: ABR)

Archiv der ETH Zürich

Weiterhin danke ich den Archiven, die mir Kopien zugesandt haben:

Staatsarchiv des Kantons Basel-Stadt

Handschriftenabteilung der Universitätsbibliothek Bonn

Archiv der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Archiv der Georg-August-Universität Göttingen

Archiv der Universität Heidelberg

Generallandesarchiv Karlsruhe

Hauptstaatsarchiv Stuttgart

Archiv der Universität Wien

Archiv der Universität Wrocław

Herrn Dipl.Phys. Karl Märker danke ich für das Korrekturlesen.

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	1
1. Die Wiederbelebung der kinetischen Gastheorie	
1.1 Anschauungen über die Wärme vor 1856	4
1.2 Die Ansätze von August Krönig und Rudolph Clausius	9
1.3 Die Diskussion über die neue Gastheorie - Clausius' Formulierung des Konzepts der mittleren freien Weglänge	28
2. Die Reibung in der Hydrodynamik und der kinetischen Gastheorie	
2.1 Die erste Arbeit von J.C.Maxwell zur kinetischen Gastheorie	35
2.2 Die Reibung in der Hydrodynamik	44
2.3 Von der Hydodynamik zur kinetischen Gastheorie - Oskar Emil Meyer	56
3. Das Laboratorium von Gustav Magnus	
3.1 Der Chemiker und Physiker Gustav Magnus	77
3.2 Die Laufbahn von August Kundt bis zur Gründung der Straßburger Universität 1872	85
3.3 Die Laufbahn von Emil Warburg bis zu seiner Berufung nach Straßburg 1872	98
4. Die Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase	
4.1 Die Untersuchung von Kundt und Warburg Teil 1: Die Reibung	101
4.2 Die Untersuchung von Kundt und Warburg Teil 2: Die Wärmeleitung	113
4.3 Kundt und Warburgs folgende Arbeiten zur kinetischen Gastheorie und ihr weiterer Weg bis zu den Berufungen nach Berlin	120
4.4 Marian v. Smoluchowskis Untersuchung des Temperatur- sprungs bei der Wärmeleitung	128
4.5 Die kinetische Gastheorie in der kritischen Diskussion	137

Zusammenfassung	141
Anhang I: Die Lebensdaten der wichtigsten im Text vorkommen- den Personen	144
Anhang II: Die Berechnung einer Näherung für die Lösung der Integralgleichung (4.1.12)	147
Fußnoten	
zur Einleitung	150
zu Abschnitt 1.1	151
zu Abschnitt 1.2	153
zu Abschnitt 1.3	160
zu Abschnitt 2.1	163
zu Abschnitt 2.2	166
zu Abschnitt 2.3	169
zu Abschnitt 3.1	176
zu Abschnitt 3.2	182
zu Abschnitt 3.3	189
zu Abschnitt 4.1	191
zu Abschnitt 4.2	193
zu Abschnitt 4.3	196
zu Abschnitt 4.4	200
zu Abschnitt 4.5	202
Bibliographie	
Unveröffentlichte Quellen	206
Gedruckte Quellen	209
Sekundärliteratur	227

Einleitung

Nachdem zur Mitte des 19. Jahrhunderts die stoffliche Auffassung der Wärme immer mehr der Vorstellung von Wärme als Bewegung gewichen war, kam es zu einer Wiederbelebung der kinetischen Theorie der Gase. Angeregt durch eine Veröffentlichung von August Krönig entwickelte Rudolph Clausius in den Jahren 1857/58 vor dem Hintergrund seiner Arbeiten zur Thermodynamik ein Konzept, das die makroskopischen Erscheinungen der Gase durch eine Hypothese von frei beweglichen Molekülen zu erklären versuchte. Gleich die ersten kritischen Einwände wiesen auf die Transportvorgänge wie Diffusion und Wärmeleitung hin, die, gemessen an den hohen Molekülgeschwindigkeiten in dieser Theorie, unverständlich langsam abliefen. Clausius setzte solchen Einwänden den Begriff der mittleren freien Weglänge entgegen, wonach ein einzelnes Molekül nur eine sehr kurze Wegstrecke geradlinig zurücklegen konnte. Diese Idee wurde im folgenden Jahr von James Clerk Maxwell aufgegriffen. Ihn interessierte vor allem, inwieweit es möglich war, allein mit der Mechanik der Stöße kleinster Teilchen die realen Naturvorgänge zu erfassen. Es gelang ihm hierbei, die drei Transportvorgänge Diffusion, Reibung und Wärmeleitung mikroskopisch zu erklären. Danach handelte es sich um eine Diffusion der Moleküle, ihrer Impulse bzw. ihrer Energie. Die neue Theorie zeigte also einen engen Zusammenhang zwischen diesen verschiedenen Erscheinungen auf. Für die Reibung und die Wärmeleitung ergab sich weiterhin, daß beide nicht druckabhängig sein sollten. Im Fall der Reibung betonte Maxwell ausdrücklich, wie erstaunlich und überraschend dieses Resultat sei.

Zu jener Zeit wurde auch die Flüssigkeitsreibung zum Gegenstand eines größeren experimentellen und theoretischen Interesses. Der

von Clausius' Thermodynamik und Maxwells Atomismus geprägten Entwicklung der kinetischen Gastheorie fügte die sich daraus ergebende Berührung mit der Hydrodynamik ein neues Moment hinzu. So dienten die zur Bestimmung der Flüssigkeitsreibung eingesetzten Torsionspendel nach geringfügigen Modifikationen auch zu den entsprechenden Messungen bei den Gasen. Die Biographie von Oskar Emil Meyer steht für die Verbindung von Hydrodynamik und kinetischer Gastheorie. Fast zur gleichen Zeit wie Maxwell gelang ihm 1865 die experimentelle Bestätigung der Voraussage über die Druckunabhängigkeit der Gasreibung. Die Untersuchung der Wärmeleitung war weitaus schwieriger, da sie stets zusammen mit Strömung und Strahlung auftritt. Die Richtigkeit von Maxwells Folgerungen auch in diesem Fall zeigte Stefan schließlich 1872. Die Theorie war aus dem Stadium einer bloßen Hypothese herausgetreten. Sie hatte nicht nur die Herleitung bereits bekannter Tatsachen, wie die der Gasgesetze, sondern auch die Entdeckung neuer Zusammenhänge ermöglicht. Das Vertrauen in ihre Zuverlässigkeit wuchs. Josef Stefan konnte feststellen: "Wenige von den physikalischen Theorien haben solche glänzend bewährte Vorherbestimmungen aufzuweisen und muss nun wohl die dynamische Theorie der Gase als eine der am besten begründeten physikalischen Theorien angesehen werden."¹ August Kundt und Emil Warburg, zwei Absolventen des Laboratoriums von Gustav Magnus in Berlin, waren 1875 in der Lage, dies quantitativ und qualitativ auszubauen. Sie beantworteten die Frage nach der unteren Grenze der Druckunabhängigkeit von Reibung und Wärmeleitung. Dabei zeigten sie, daß die Aussagefähigkeit der zugrundeliegenden Hypothese bislang noch nicht ausgeschöpft worden war. Die Theorie führte außerdem zu der Entdeckung eines neuen Effekts, dem Auftreten einer Gleitung der Gase bei genügend kleinen Drücken. Das bedeutete, daß die der Gefäßwandung benachbarte

Schicht einer Gasströmung nicht an dieser haften, sondern mit einer endlichen Geschwindigkeit auf ihr "gleiten" sollte. Hermann Helmholtz glaubte 1860 bei den Flüssigkeiten einen analogen Effekt gefunden zu haben, was jedoch 48 Jahre später definitiv widerlegt wurde. Dies war ein rein phänomenologischer Ansatz, von dem sich die Gleitung der Gase auch im Ergebnis durch ihre umgekehrte Proportionalität zum Druck unterschied. Es war also weniger die Existenz der Gleitung, die auch heute noch bei den Quantenflüssigkeiten eine Rolle spielt², als vielmehr die Art und Weise ihrer Herleitung einschließlich der Abhängigkeit von anderen Größen, welche die Fruchtbarkeit der kinetischen Theorie unterstrich. In Albert Einsteins häufig zitierter, wohlwollender Laudatio auf Warburg aus dem Jahr 1922 hieß es dazu: "Es war das erste Mal, daß auf Grund der molekularen Theorie der Wärme ein neues Phänomen vorausgesagt worden war, und zwar ein Phänomen, dessen Darstellung auf Grund der kontinuierlichen Auffassung der Materie so gut wie ausgeschlossen war." Mit der Bezeichnung des "ersten Males" ignorierte Einstein Maxwells Entdeckung der Druckunabhängigkeit der Reibung. Einstein fuhr fort: "Hätten die Energetiker am Ende des 19. Jahrhunderts diese Argumente genügend gewürdigt, so hätten sie die tiefe Berechtigung der Molekulartheorie schwerlich ernsthaft in Zweifel ziehen können."³ Der zeitliche Abstand verzerrt hier Einsteins Perspektive. Es gab durchaus auch Gründe, das Modell in Frage zu stellen. Jeder einzelne Widerspruch erschütterte den Anspruch, damit die realen Naturvorgänge zu beschreiben. So bildeten die Werte für die spezifischen Wärmen ein Problem, das letztlich erst die Quantentheorie lösen konnte. Ebenso stellte die Temperaturabhängigkeit der Transportkoeffizienten eine Schwierigkeit dar. Im letzten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts mehrte sich die Skepsis. Max Planck

meinte auf der Naturforscherversammlung 1891: "Indessen scheinen nach den ersten glänzenden Resultaten der kinetischen Gastheorie ihre neueren Fortschritte den daran geknüpften Erwartungen nicht zu entsprechen; bei jedem Versuche diese Theorie sorgfältiger auszubauen, haben sich die Schwierigkeiten in bedenklicher Weise gehäuft."⁴ Die sogenannten Energetiker, wie z.B. Wilhelm Ostwald, lehnten den Atomismus insgesamt als unzweckmäßig ab und wollten eine vom Energieerhaltungsprinzip ausgehende Betrachtungsweise an dessen Stelle setzen.

Der Gleitung, einer Sprungunstetigkeit der Geschwindigkeit an der Gefäßwand, entsprach bei der Wärmeleitung ein Temperatursprung. Der experimentelle Nachweis war Kundt und Warburg 1875 noch nicht gelungen. Warburg, mittlerweile Ordinarius in Berlin, stellte diese Aufgabe 1897 Marian von Smoluchowski. Der beobachtete dann auch den erwarteten Effekt und erklärte ihn im Rahmen der kinetischen Gastheorie. Es war eine der beiden neuen Arbeiten, auf die Ludwig Boltzmann 1898 mit der Bemerkung hinwies, daß man deren Ergebnisse "in keiner anderen Weise hätte erhalten können".⁵

Die Untersuchungen zur Reibung und Wärmeleitung haben die Auseinandersetzung um die kinetische Gastheorie zwar nicht entschieden, aber wesentlich dazu beigetragen, deren Leistungsfähigkeit zu demonstrieren.

1. Die Wiederbelebung der kinetischen Gastheorie

1.1 Anschauungen über die Wärme vor 1856

Die von August Krönig und Rudolph Clausius 1856/57 formulierte kinetische Theorie der Gase war keineswegs völlig neu. So hatten sich bereits im 18. Jahrhundert Herman, Euler, D.Bernoulli und Lomonosov mit den Bewegungen der kleinsten Teilchen eines Gases beschäftigt und teilweise daraus auch Beziehungen für den Druck hergeleitet.¹ In der ersten Hälfte des 19.Jahrhunderts entstanden in Großbritannien durch Herapath seit 1816 und Waterston seit 1843 Ansätze zu einer kinetischen Theorie, die jedoch wirkungsgeschichtlich eine fast zu vernachlässigende Rolle gespielt haben. Dies lag nicht zuletzt an den Schwierigkeiten, die ihnen als Außenseitern von Zeitschriftenherausgebern sowie von Mitgliedern der Royal Society gemacht wurden.²

Die Wärme faßte man zu jener Zeit noch überwiegend als eine Substanz auf. Rumford und Davy hatten geglaubt, dies mit ihren Reibungsexperimenten von 1798 und 1799 widerlegt zu haben, jedoch kaum Beachtung gefunden.³ Die Stofftheorie war besonders in Frankreich in den zwanziger Jahren weiter ausgebaut worden. So lieferte sie beispielsweise bei den adiabatischen Zustandsänderungen auch quantitativ überzeugende Erklärungen. Laplace erkannte die Bedeutung dieser Vorgänge bei der Ausbreitung des Schalls. Aus der bis dahin benützten Formel für dessen Geschwindigkeit, die noch auf Newton zurückging, ergaben sich zu kleine Werte. Durch Hinzufügen eines Faktors - der Wurzel aus dem Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und konstantem Volumen - gelang es ihm, eine hinreichende Übereinstimmung mit den Meßergebnissen herzustellen. In seiner "Mécanique Céleste" verband er dies mit Modellvorstellungen über die Natur der Wärme. Dabei

ging er von zwei Teilchenarten aus: den Molekülen der Materie und den sie als Hülle umschließenden kalorischen Partikeln. Die bei kleinen Abständen auftretende Abstoßung der nur mit attraktiven Kräften begabten Moleküle rührte danach ausschließlich von den kalorischen Teilchen her.⁴ Mit einigen weiteren Annahmen konnte Laplace hieraus die Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac ableiten.⁵ Poisson zeigte im gleichen Jahr die Unabhängigkeit der Aussagen über die adiabatischen Zustandsänderungen von speziellen Modellen. Als Voraussetzung benützte er lediglich, daß die Wärme eine Zustandsgröße sei.⁶ Bei diesen Prozessen, die definitionsgemäß ohne Wärmeaustausch ablaufen, führt das zu keinem Widerspruch. Die Ergebnisse werden heute als "Poissonsche Gleichungen" bezeichnet.⁷ Die Stofftheorie war zumindest vorläufig kein Hindernis für die weitere Entwicklung. Carnot benützte sie in seiner Abhandlung über die Wärmekraftmaschinen.⁸ Fourier äußerte sich in seiner Theorie der Wärmeleitung gar nicht zur Natur der Wärme, weil diese Frage keinen Einfluß auf die Ergebnisse hatte.⁹

Eine andere Anschauung über die Wärme entstand angesichts der zahlreichen Analogien von Wärme- und Lichtstrahlen, die in den dreißiger Jahren nachgewiesen werden konnten.¹⁰ So zeigte die Wärme ebenfalls Phänomene wie Brechung, Reflexion und Polarisation. Das fand Eingang in die Lehrbücher, in denen Wärme nun als Bewegung oder genauer als Schwingung von Ätherteilchen dargestellt wurde.¹¹ Mit dieser Vibrations- bzw. Wellentheorie ließen sich solche Zusammenhänge qualitativ erklären.¹² Aber wichtige Fragen wie die nach dem Erwärmungsvorgang durch Strahlung blieben offen.¹³ Die Verbindung von Wärme und Bewegung erhielt durch die Formulierungen des Energieerhaltungssatzes in den vierziger Jahren eine quantitative Bedeutung.¹⁴ Ein bestimmter Betrag mechanischer Energie ist danach in einem entsprechenden Umwandlungsprozeß stets

mit der gleichen Wärmemenge verknüpft. Auch wenn das noch keine zwingende Aussage über die Natur der Wärme beinhaltete¹⁵, bestärkte es ein physikalisches Weltbild, bei dem die Rückführung aller Erscheinungen auf Bewegungsvorgänge angestrebt wurde¹⁶. Nun ist der in mehreren Arbeiten um 1850 vollzogene Schritt naheliegend, eine Proportionalität von Wärme und kinetischer Energie der Molekülschwingungen oder allgemeiner der Molekülbewegungen anzusetzen.¹⁷

Die Wärmostofftheorie verschwand nur allmählich. Bis in die fünfziger Jahre gab es Äußerungen, die ihre Unverträglichkeit mit den neuen Erkenntnissen betonten. Die Tatsache dieser zwar negativen Erwähnungen macht allerdings deutlich, daß es immer noch intellektueller Bemühungen bedurfte, um der Vorstellung von Wärme als Bewegung allgemeine Anerkennung zu verschaffen. So führte Helmholtz 1847 aus, "dass ... die Wärmeerscheinungen nicht hergeleitet werden können von einem Stoffe, welcher durch sein blosses Vorhandensein dieselben bedinge, sondern dass sie abzuleiten seien von Veränderungen von Bewegungen, sei es eines eigenthümlichen Stoffes, sei es der schon sonst bekannten ponderablen und imponderablen Körper"¹⁸. In einem Referat von 1855 äußerte er wie "die Unhaltbarkeit der materiellen Wärmetheorie, die Annahme eines Wärmostoffs, immer mehr in die Augen springt"¹⁹. Clausius hatte 1850 feststellen können, "dass in neuerer Zeit immer mehr Thatsachen bekannt werden, welche dafür sprechen, dass die Wärme nicht ein Stoff sei, sondern in einer Bewegung der kleinsten Theile der Körper bestehe."²⁰ Auch in einem populären Vortrag von 1857 glaubte er, die Widersprüche der Stofftheorie noch herausstellen zu müssen.²¹ Auf der Naturforscherversammlung 1856 sah v.Baumgartner eine neue Zeit für die Wärmelehre anbrechen, da der Stofftheorie durch "die scharfe Darstellung der Umsetzbarkeit von

bewegende in moleculare Kraft" der Todesstoß versetzt worden sei.²²

Ein umfassendes Konzept gab es jedoch nicht. Um die Wärme als Bewegung der Atome bzw. Moleküle verstehen zu können, schienen Kenntnisse über deren Beschaffenheit notwendig, mußten die Atome unter diesem Gesichtspunkt selbst zum Gegenstand der Forschung werden. Der Atomismus, also die Annahme einer korpuskularen Struktur der Materie, war in der Physik damals nicht umstritten.²³ So hatte schon die Erklärung der Dispersion bei der Wellentheorie des Lichts diskrete Ätherteilchen gefordert.²⁴ Einige Autoren versuchten nun, das makroskopische Verhalten der Materie allein aus den Eigenschaften der Atome zu erklären.²⁵ Die an Laplace erinnernde Verwendung zweier Teilchensorten - an die Stelle der Wärmeteilchen waren Ätherpartikel getreten - sollte vermeiden, der Materie gleichzeitig anziehende und abstoßende Kräfte zuzuschreiben. Der hohe Anspruch, auf diese Weise nicht nur die Wärme, sondern im Sinn einer ganzheitlichen Naturbeschreibung auch die Phänomene der Elektrizität und des Magnetismus zu erfassen, konnte nicht eingelöst werden. Aus den willkürlich erscheinenden Voraussetzungen ergaben sich keine neuen Erkenntnisse.

1.2 Die Ansätze von August Krönig und Rudolph Clausius

Krönig war vor seiner 1856 erschienenen Publikation "Grundzüge einer Theorie der Gase"¹ noch nicht mit originellen Ideen hervorgetreten. Nach drei Semestern Philologie verließ er im Herbst 1840 Bonn, um in Berlin das Studium der Mathematik, Physik und Chemie zu beginnen.² Ein Promotionsversuch scheiterte 1843.³ Am 15.3.1845 erwarb er dann im Alter von 22 Jahren den Doktorgrad mit einer Dissertation über chromsaure Salze.⁴ Anschließend wurde er Lehrer in Berlin. Im Rahmen des auch für diesen Beruf verbindlichen Forschungsimperativs⁵ konnte er seinen naturwissenschaftlichen Neigungen hierbei weiter nachgehen. Zuerst wirkte Krönig als Hilfslehrer am Cöllnischen Realgymnasium, bis er 1851 eine Anstellung an der Königlichen Realschule erhielt.⁶ Bereits in dem Gründungsjahr 1845 wurde er Mitglied der "Berliner Physikalischen Gesellschaft".⁷ Zu ihr gehörten sowohl Schüler des Physiologen Johannes Müller wie Hermann Helmholtz und Emil du Bois-Reymond als auch Techniker wie Werner Siemens und Johann Halske. Bei den Zusammenkünften jüngerer, noch nicht etablierter Naturforscher konnten neue Ideen auf ein unvoreingenommenes Publikum hoffen. Hier trug Helmholtz 1847 erstmals seine Arbeit über die Energieerhaltung vor. Während der folgenden Auseinandersetzungen, in der diese teilweise als reine Spekulation abgetan wurde, fand Helmholtz die "Gesellschaft" auf seiner Seite.⁸ Neben der Möglichkeit, sich außerhalb der Universität in Diskussionen ohne Profilierungsdruck austauschen zu können, gab sie in solchen Situationen also auch psychologischen Rückhalt, eine Erfahrung, die andere vielleicht ermutigte. Krönig wurde 1848 ihr Schriftführer und redigierte ab 1855 die "Fortschritte der Physik", ein von der "Gesellschaft" seit 1847 herausgegebenes Referatenorgan.⁹ Es

enthielt eine nach Spezialgebieten gegliederte Übersicht der verfügbaren in- und ausländischen Publikationen. Die bibliographischen Angaben wurden meist durch eine Inhaltsangabe ergänzt. Das konnte manchmal auch kommentierende Erläuterungen umfassen. Krönig hatte sich schon früher bei der Bearbeitung neuerer Literatur engagiert. Die Herausgabe einer eigenen Zeitschrift, die der größeren Verbreitung der ausländischer Fachliteratur durch den Abdruck deutscher Übersetzungen dienen sollte¹⁰, mußte er jedoch bereits nach dem ersten Jahrgang von 1851 wieder einstellen.¹¹ An die Tätigkeit bei den "Fortschritten" knüpft sich in jüngerer Zeit die Vermutung, Krönig hätte, als er seine Ansichten über die Gastheorie formulierte, die Arbeit Waterstons "On a General Theory of Gases" gekannt.¹² Das stützt sich auf deren Erwähnung in dem Band der "Fortschritte" für die Jahre 1850 und 1851.¹³ Der erschien mit der bis 1899 üblichen Verspätung gerade in Krönigs erstem Redaktionsjahr 1855.¹⁴ In einem sehr ausführlichen Referat über den Stand der Theorie der Wärme vermerkte Helmholtz nur kurz, daß Waterstons Abhandlung "die allgemeinen Grundzüge einer mechanischen Erklärung der Wärmeerscheinungen" geben würde.¹⁵ Am Anfang seiner Literaturübersicht nannte Helmholtz als grundlegende Hypothese für alle Theorien der Wärme, "daß man sich die Körper als aus Atomen zusammengesetzt denkt, welche selbst wieder aus differenten Theilen bestehen"¹⁶. In der kinetischen Energie inneratomarer Bewegungen sah er ein Maß für die Wärmequantität. Seine Vorstellung von Verschiebungen in den Atomen führte aber nicht weiter. Für die weitere Forschung auf diesem Gebiet rechtfertigte er eine axiomatisch-deduktive Vorgehensweise: "Soll die specielle Art der Zusammensetzung der Atome und der Bewegungen innerhalb derselben bestimmt werden, so ist dabei der Willkür vorläufig ein sehr großer Spielraum gelassen. Doch sind Versuche, dergleichen

Hypothesen auszubilden, immer dankenswerth, da aus solchen Versuchen, wo ihre Folgerungen mit der Wirklichkeit übereinstimmen, sich doch endlich einzelne allgemeine Anhaltspunkte ergeben können für die Art, wie wir uns die Atome konstituiert zu denken haben."¹⁷ Es kann nicht mit Sicherheit entschieden werden, ob Krönig seine Ideen unabhängig von Waterston fand. Er selbst publizierte keine weiteren Beiträge mehr dazu. In der "Gesellschaft" referierte er 1858 noch über Diffusionsvorgänge in Gasen¹⁸, wobei er offenbar Gedanken von Clausius zur mittleren freien Weglänge aufgriff.¹⁹ Eine schwere Erkrankung, vermutlich multiple Sklerose, beendete seine Tätigkeiten dann relativ früh.²⁰ Die Redaktion der "Fortschritte" gab er 1859 auf, 1864 wurde er als Lehrer pensioniert. Im gleichen Jahr verfaßte er ein Chemielehrbuch, das aber keine gute Aufnahme fand.²¹ Danach beschäftigte er sich, immer stärker durch Lähmungen behindert²², zunehmend mit theologischen Fragen.²³ Im Alter von 56 Jahren starb er 1879 in Berlin.

Seine Hypothese ging für die gasförmigen Körper von Atomen aus, die sich, bis auf elastische Stöße untereinander und solche gegen die Gefäßwand, frei und geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Daraus ergaben sich die Gasgesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac.²⁴ Das stellte für ihn eine Bestätigung seines Ansatzes dar, eine Folgerung, die mit der Wirklichkeit übereinstimmte. Er glaubte, daß es eine Erklärung der Gasgesetze durch die Bewegungen der Atome bislang noch nicht gegeben hätte. Offenbar war ihm das im letzten Abschnitt erwähnte Modell von Laplace unbekannt. Jenes beruhte zwar auf der Stofftheorie, konnte aber die makroskopischen Gasgesetze ebenfalls aus mikroskopischen Bewegungen herleiten. Nur in einem Halbsatz ging Krönig auf die Vibrationstheorie ein, wenn er bemerkte, daß die Atome "nicht etwa um eine Gleichgewichtslage" oszillierten.²⁵ Mit diesem Konzept setzte er sich inhaltlich nicht

weiter auseinander, da er von den Kräften zwischen den Atomen absah. Das bedeutete jedoch auch, auf jegliche Einbettung in einen allgemeineren Zusammenhang zu verzichten. Krönigs Ansatz wurde wohl deshalb als "eine von den bisherigen Vorstellungen der Physiker ziemlich abweichende Hypothese" bezeichnet.²⁶ Andererseits bot die mit 7 Druckseiten relativ kurze Arbeit eine Herleitung bekannter Formeln ohne großen technischen Aufwand. Allein dadurch konnte sie Interesse erwecken.²⁷

Der Druck eines Gases sollte das Resultat der elastischen Stöße der Atome gegen die Gefäßwand sein. Krönig vermutete, daß deren Oberfläche gemessen an den Dimensionen der Gasatome sehr höckerig sein müßte. Vermutlich war dies für ihn eine Konsequenz der korpuskularen Struktur der festen Körper. Die Stöße der Gasatome würden sich dann allerdings nicht mehr berechnen lassen. Krönig berief sich hier auf die Gesetze der Wahrscheinlichkeitsrechnung, die nach seiner Ansicht eine Rechtfertigung dafür lieferten, die unregelmäßige Streuung bei den großen Teilchenzahlen wie eine regelmäßige zu behandeln.²⁸ Bezüglich der Stöße gab es deshalb keinen Unterschied zwischen der realen und einer völlig ebenen Oberfläche. Als Gefäß wählte Krönig einen Quader mit den Dimensionen X, Y, Z . Zur Durchführung der Rechnung nahm er weitere Vereinfachungen vor. Die Gasatome sollten die Wände immer senkrecht treffen. Unter dieser Voraussetzung konnten sie sich nur auf der stets gleichen Bahn von der einen bis zu der gegenüberliegenden Wand hin- und herbewegen. Krönig verteilte die n Atome der Masse m und der Geschwindigkeit v gleichmäßig auf die drei Wandpaare. Beispielsweise treffen $(1/3) n$ Atome die Wand mit der Fläche YZ . Durch jeden Stoß erhält sie den Impuls $2mv$. Krönig übersah den Faktor 2. Bis das gleiche Atom YZ wieder erreicht, muß es den Weg $2X$ zurücklegen. Insgesamt wird auf die Wand pro

Zeiteinheit demnach ein Impuls von $(n/3) (2mv) (v/2X)$ übertragen. Bezeichnet $V = XYZ$ das Volumen des Gasbehältnisses, so ist der Druck p :

$$p = (1/3) nmv^2/V \quad (1.2.1)$$

Krönig ließ den numerischen Faktor in diesem Ergebnis weg, denn es ging ihm nur um eine qualitative Obereinstimmung mit der Erfahrung. Anschließend setzte er die kinetische Energie mv^2 (um den Faktor 2 zu groß) gleich der absoluten Temperatur T . Die verschiedenen physikalischen Einheiten berücksichtigte er nicht. Das lieferte die Beziehung:

$$p = nT/V \quad (1.2.2)$$

Damit hatte Krönig die Gasgesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac hergeleitet. Man wußte aber, daß sie nicht streng gelten. Krönig glaubte, dies durch Stöße der Atome untereinander erklären zu können. Solche kamen dann zustande, wenn sich mehrere Atome auf derselben Geraden bewegten. Die unterschiedliche Dauer dieser Stoßvorgänge war nach Krönigs Ansicht für die Abweichungen von den Gasgesetzen verantwortlich. Weiterhin zeigte er, wie aus (1.2.2) der von ihm nicht so bezeichnete Satz von Avogadro folgte. Danach enthalten gleich große Gasvolumina bei übereinstimmenden Werten für Druck und Temperatur die gleiche Anzahl von Teilchen. Die rasche Ausbreitung der Gase in geschlossenen Räumen betrachtete er als eine anschauliche Bestätigung für die Idee freier Atombewegungen. Bei gleicher Temperatur müssen die leichteren Gase gemäß $v^2 = T/m$ schneller diffundieren. Die Relation $Q = nmv^2 = nT$ für die Wärmemenge Q eines Gases ergab die Gleichheit der spezifischen Molwärmen aller Gase. Abschließend wies er auf die Obereinstimmung seines Konzepts mit den Experimenten im Fall der Volumenänderungen hin. Die freie Expansion läßt die Atomgeschwindigkeit und deshalb auch die Temperatur konstant. Dagegen gewinnen

die Atome bei der Kompression kinetische Energie und dementsprechend nimmt die Temperatur zu. Wird Arbeit verrichtet, tritt das Umgekehrte ein.

Krönigs Publikation enthält keinerlei Hinweise auf Untersuchungen anderer Autoren. So hätte es sich angeboten, die Aussage über die spezifischen Wärmen mit den experimentellen Ergebnissen zu vergleichen. Er scheint die Vorstellung von den sich frei bewegenden Atomen nicht als Idealisierung eines komplizierteren Vorgangs, sondern als eine reale Beschreibung der Natur verstanden zu haben. Darauf deutet sein Versuch hin, die beschränkte Gültigkeit der idealen Gasgesetze noch mit dem Modell selbst erklären zu wollen. Bei der "Berliner Physikalischen Gesellschaft" trug er diese Ideen am 30.5.1856 vor.²⁹ Im Unterschied zu den wissenschaftlich isolierten Engländern Herapath und Waterston, die schon früher ähnliche Konzepte entwickelt hatten, erreichte Krönig dann über die Publikation in den "Annalen" sowie Besprechungen in ausländischen Zeitschriften ein großes Publikum.³⁰

Rudolph Clausius in Zürich gehörte dazu. Er hatte sein Studium 1840 in Berlin begonnen und war dort ab 1850 Privatdozent gewesen bis er 1855 den Ruf auf eine Professur an der neugegründeten Polytechnischen Schule in Zürich annahm. In seinen Publikationen hatte er es bislang vermieden, die Wärme mikroskopisch zu deuten. Er betrachtete sie zwar als eine Bewegung, ging aber nicht darauf ein, von welcher Art diese Bewegung sei. Charakteristisch eine Äußerung aus dem Jahr 1850: "Es soll hier auf die Art der Bewegung, welche man sich etwa im Innern der Körper vorstellen kann, nicht näher eingegangen, sondern nur im Allgemeinen angenommen werden, dass eine Bewegung der Theilchen bestehe, und dass die Wärme das Maass der lebendigen Kraft derselben sei"³¹. Nun wurde die Arbeit von Krönig für ihn zum Auslöser, die bisherige

Zurückhaltung aufzugeben. Seine Bemerkung, daß er schon vor 1850 ähnliche Vorstellungen wie Krönig entwickelt habe³², erscheint vor dem Hintergrund seiner früheren Publikationen durchaus glaubwürdig. Die jahrelangen Bedenken von Clausius, damit an die Öffentlichkeit zu treten, weil er dem "noch nicht den Grad der Vollständigkeit geben konnte, welcher [ihm] für die Publikation notwendig zu sein schien"³³, deuten auf eine besondere Vorsicht hin. Sie artikuliert sich auch später noch in dem Bedürfnis, die Thermodynamik nicht mit den Hypothesen der kinetischen Gastheorie zu verknüpfen, um "die Schlüsse, welche sich aus gewissen allgemeinen Prinzipien ableiten lassen, von denjenigen, welche eine bestimmte Art der Bewegung voraussetzen, zu trennen"³⁴. Diese Einstellung hing sicherlich auch mit seinem wissenschaftlichen Umfeld in Berlin zusammen, wo Forscher wie Poggendorff und Magnus dem Gebrauch von Hypothesen eher skeptisch gegenüberstanden.

Clausius gehörte zu den ersten zehn Teilnehmern des Kolloquiums, das Gustav Magnus ab 1843 regelmäßig in seinem Haus abhielt.³⁵ Jeder Student hatte im Lauf des Semesters über die neueste Literatur eines speziellen Gebiets der Physik vorzutragen. Dabei beschäftigte sich Clausius aufgrund eines Referats über Clapeyrons "Abhandlung über die bewegende Kraft der Wärme" wohl erstmals intensiv mit der Wärmetheorie.³⁶ Diese Untersuchung erschien in Frankreich bereits 1834, war aber wegen ihrer Bedeutung noch 1843 in den "Annalen" nachgedruckt worden.³⁷ Darin brachte Clapeyron die Ideen von Carnot in eine mathematische Sprache und veranschaulichte dessen Kreisprozeß in der bis heute bekannten Zeichnung. Dies machte das nicht mehr erhältliche Werk von Carnot³⁸ erst in größerem Maß bekannt.³⁹ Beide Arbeiten basierten noch auf dem Konzept eines unzerstörbaren Wärmestoffs. Clausius behandelte 1850 in "Ueber die bewegende Kraft der Wärme"⁴⁰ das gleiche Thema unter

Verwendung des Energieerhaltungssatzes. In diesem Aufsatz stellte er einen zweiten Grundsatz der Wärmelehre auf.⁴¹ Das war bereits eine spezielle Form des zweiten Hauptsatzes. Er entwickelte hier auch eine Idee, wie der flüssige in den gasförmigen Zustand übergeht. Bei der Änderung des Aggregatzustands gibt es eine Wärmemenge, die ohne Temperaturänderung frei bzw. gebunden wird. Diese "latente Wärme", ein Begriff der Stofftheorie, interpretierte Clausius zu einem Teil als Arbeit gegen den äußeren Druck, zum anderen als Arbeit zur Überwindung der gegenseitigen Anziehungskraft der Teilchen des betreffenden Stoffes. Der Schritt zu der Grundannahme der kinetischen Gastheorie scheint nicht mehr weit, wenn er bemerkte: "... dass die gegenseitige Anziehung der Theilchen, welche im Innern der festen und tropfbar flüssigen Körper wirkt, bei den Gasen schon aufgehoben sei"⁴². Ohne die Wirksamkeit einer Anziehungs- oder Abstoßungskraft müßten sich die Teilchen nach den Gesetzen der Mechanik geradlinig gleichförmig fortbewegen. Es bestanden noch andere Anschauungen. So glaubte Helmholtz, daß Bewegungen innerhalb der Atome die Molekularkräfte verändern und so zu einem Wechsel des Aggregatzustands führten.⁴³

Clausius verdiente sich seinen Lebensunterhalt nach dem Bestehen des Lehrerexamens im Jahr 1844 an einem Berliner Gymnasium.⁴⁴ Seine Dissertation über die Lichtstreuung in der Atmosphäre reichte er 1847 in Halle ein.⁴⁵ Er verfaßte noch weitere Arbeiten auf dem Gebiet, das man als meteorologische Optik bezeichnete.⁴⁶ So schrieb er, einem Wunsch des Herausgebers Grunert entsprechend, für dessen Journal einen mit fast 100 Seiten recht umfangreichen Übersichtsartikel, der allgemeinverständlich gehalten war.⁴⁷ Ansonsten zeichneten sich seine Arbeiten gerade durch ihre starke theoretisch-mathematische Gewichtung aus.⁴⁸ Diese Arbeitsrichtung verlangte recht häufig den Gebrauch von

Hypothesen. Ähnlich wie Helmholtz erläuterte Clausius deren Stellenwert für seine Arbeit: "... muß man freilich gewisse Lücken in unseren Kenntnissen durch Hypothesen ausfüllen, und dadurch verlieren die Resultate an Zuverlässigkeit; aber einerseits werden sie wegen der Wichtigkeit des Gegenstandes doch Interesse behalten, und andererseits ist es gerade die consequente Durchführung irgend einer Hypothese mit allen ihren Folgen, welche am besten zu Resultaten führen kann, die sich mit der Wirklichkeit vergleichen lassen, und dadurch zur Bestätigung oder Widerlegung der Hypothese selbst beitragen"⁴⁹. So benützte er beispielsweise die Annahme, daß die atmosphärische Lichtstreuung durch in der Luft schwebende Dunstbläschen entstehen würde.⁵⁰ Das fand offenbar Beachtung, denn die holländische Akademie in Haarlem setzte einen Preis für deren experimentellen Nachweis aus.⁵¹

Ein im Hinblick auf die kinetische Gastheorie bedeutsames Faktum war die Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung bei diesen Untersuchungen.⁵² Unter dem gleichen Aspekt ist hier auch eine 1849 erschienene Arbeit über elastische Körper von Interesse.⁵³ Darin kombinierte Clausius die analytische Behandlung von Molekularkräften mit statistischen Betrachtungen. Ausgangspunkt waren Experimente von Wertheim⁵⁴, bei denen die Volumenvermehrung eines Stabes, der durch ein angebrachtes Gewicht etwas gedehnt wurde, von dem theoretisch vorhergesagten Wert abwich. Clausius analysierte deshalb die dazu vorliegenden und somit unzureichenden Theorien von Cauchy und Poisson. Für die Wechselwirkung zwischen zwei Molekülen des Stabes mit dem Abstand r setzten diese eine unbekannte Zentralkraft $f(r)$ an. In den Rechnungen tauchten dann Terme der folgenden Art auf: $\sum r f(r) \cos^2 \alpha$, $\sum r f(r) \cos \alpha \cos \beta$, $\sum r f_1(r) \cos^4 \alpha$, $\sum r f_1(r) \cos^3 \alpha \cos \beta$, $\sum r f_1(r) \cos^2 \alpha \cos^2 \beta$,

$\sum r f_1(r) \cos 2\alpha \cos \beta \cos \gamma$. Summiert wurde über alle Moleküle der sogenannten Wirkungssphäre eines ausgewählten Moleküls. Dabei waren α, β und γ die Winkel zwischen den Ortsvektoren der einzelnen zu summierenden Moleküle und den drei Koordinatenachsen. Die Abkürzung $f_1(r)$ stand für $r \, df(r)/dr - f(r)$. Es galt nun die Zahl der nichtverschwindenden Summen durch Symmetriebetrachtungen möglichst klein zu halten. Die Reduktion auf deren zwei gelang Cauchy mit der Annahme einer völlig regelmäßigen Anordnung der Moleküle. Clausius betrachtete dies als eine zu spezielle Bedingung, die dem Problem nicht angemessen wäre. Poisson ging bei den Winkeln von der Summation zur Integration über. Die dafür notwendigen Voraussetzungen sah Clausius nicht unbedingt als erfüllt an. Er fand bessere Argumente zur Stützung von Poissons Theorie: "... muß man sein Augenmerk nicht auf ein Molekül mit seiner Wirkungssphäre beschränken, sondern unzählig viele solche Systeme gleichzeitig betrachten, und für jede Summe den Mittelwert aus allen den Werten, die sie bei den einzelnen Systemen annimmt, zu erhalten suchen. ... Man denke sich dazu ein Normalsystem gebildet, welches den mittleren Zustand aller einzelnen Systeme darstellt"¹⁵. In diesem Normalsystem fielen alle statistischen Unregelmäßigkeiten heraus. Es blieb aber die unzureichende Übereinstimmung der Theorie mit dem Experiment. Da in den Formeln eine Verschiebung der Moleküle berücksichtigt worden war, mußte es nach der Auffassung von Clausius weitere innere Veränderungen in dem gedehnten Körper geben. So fand er es naheliegend, zusätzlich noch Drehungen der Moleküle anzunehmen. Das ging über eine rein qualitative Aussage jedoch nicht hinaus. Diese Untersuchung von Clausius dokumentiert neben einem Verständnis für statistische Überlegungen auch seine guten Kenntnisse der Arbeiten französischer Theoretiker wie Cauchy, Poisson und Laplace. Die von

Clausius zitierten Ansichten von Poisson und Laplace über das unterschiedliche Verhalten der Moleküle in festen und flüssigen Körpern⁵⁶ zeigen, wie lange er sich damit bereits auseinandersetzte und woher er einen Teil seiner Anregungen bezog.

Seine bisher von ihm angeführten Arbeiten bildeten die Grundlage für das Habilitationsverfahren im Jahr 1850.⁵⁷ Es scheint so, als vermutete Clausius Probleme in Berlin, denn er hatte sich 1849 um eine Habilitationsgelegenheit in Breslau bemüht.⁵⁸ An der dortigen Universität konnte er jedoch keine Anstellung erhalten, wohingegen er in Berlin als Lehrer über feste Einnahmen verfügte. Aufgrund der zu beurteilenden Beiträge zur mathematischen Physik war es für die Fakultät schwierig, geeignete Gutachter zu finden. G.Magnus, der diese Aufgabe bei drei Habilitationen von Physikern zu jener Zeit übernahm⁵⁹ und den Clausius im Vorjahr als Referenz angegeben hatte⁶⁰, wäre hier als reiner Empiriker wahrscheinlich überfordert gewesen. Die Mathematiker Dirichlet und Steiner, auf deren positives Urteil sich Clausius berufen konnte⁶¹, standen nicht zur Verfügung. Dirichlet erhielt durch formale Hindernisse erst 1851 die vollen Rechte eines Ordinarius⁶², eine Stellung die Steiner nie erreichte⁶³. Bei allen Promotionen und Habilitationen in der Mathematik der vorangegangenen fünf Jahre hatte der Astronom J.F.Encke, ein Schüler von Gauß mit umfassender mathematischer Bildung, die Funktion eines Gutachters ausgeübt.⁶⁴ So fiel ihm auch in dem Verfahren von Clausius diese Rolle zu. Er mußte sich dabei mit Teilen der mathematischen Physik beschäftigen, die ihm, wie er am Ende seiner Stellungnahme einräumte, sehr fremd waren.⁶⁵ Die Leistungen von Clausius bewertete er insgesamt positiv, vermied aber definitive Festlegungen bei der Kommentierung der einzelnen Veröffentlichungen. So nannte er die verwendeten Hypothesen plausibel, fügte jedoch einschränkend hinzu, daß "auch nicht

allein darin die Erklärung zu suchen ist".⁶⁶ Er bezog sich hier auf die Annahme der Existenz von Wasserbläschen bei der atmosphärischen Lichtstreuung, die vermutete Drehung der Moleküle in der Untersuchung zur Elastizität sowie die "Modifikation des Carnotschen Grundsatzes". Die Methodik akzeptierte Encke in diesem Zusammenhang: "Die ... angeführten Untersuchungen berühren das Gebiet unserer Kenntnis von der inneren Zusammensetzung der Körper so innig, daß bei der Mangelhaftigkeit derselben, sich ein definitives Resultat jetzt gar nicht, u. vielleicht für längere Zeit auch künftig nicht, hoffen läßt. Es wird deshalb bei solchen höchst verdienstlichen Untersuchungen, mit denen nothwendig in der mathematischen Physik begonnen werden muß, darauf ankommen, ob die angenommenen Hypothesen als ansprechend anerkannt werden können"⁶⁷. Nachdem, wie Encke berichtete, die Lehrbefähigung von Clausius aufgrund von Erkundigungen nicht angezweifelt wurde, konstatierte er, "daß die Habilitation des Herrn Clausius bei der hiesigen Universität in der Tat als ein Gewinn anzusehen ist."⁶⁸ Dove stimmte dem als Zweitgutachter kommentarlos zu.

Im gleichen Jahr erhielt Clausius eine Stelle an der "Vereinigten Artillerie- und Ingenieurschule", wo Magnus und Dove seine Vorgänger gewesen waren.⁶⁹ Er konnte nun die Tätigkeit am Gymnasium aufgeben. An der Universität las er über mechanische Wärmetheorie⁷⁰ und besuchte auch weiterhin das Kolloquium von Magnus⁷¹. Manche Kollegen betrachteten Clausius' Arbeitsrichtung als höchst einseitig. So bezweifelte P.Jolly 1854 in einem Gutachten über die eigene Nachfolge in Heidelberg, ob Clausius überhaupt praktische Erfahrung mit experimenteller Physik habe.⁷² Der Ruf ein Physiker zu sein, der nie einen Versuch gemacht hätte, blieb an ihm haften.⁷³ Das war problematisch zu einer Zeit, in der es kaum spezielle Stellen für mathematische Physiker gab. Eine Ausnahme

ergab sich 1855 an der neugegründeten Polytechnischen Schule in Zürich, die nach der Absage des Wunschkandidaten R.Kohlrausch ausdrücklich einen solchen suchte.⁷⁴ Clausius wurde von Poggendorff und Wilhelm Weber, der ihn neben F.Neumann und G.Kirchhoff zu den profiliertesten Forschern dieser Richtung zählte, dafür empfohlen.⁷⁵ Die Verhandlungen verliefen erfolgreich und im Herbst 1855 begann er dort mit seiner Vorlesungstätigkeit. Die Wärmelehre stellte weiterhin einen besonderen Schwerpunkt dar.⁷⁶ Er galt mittlerweile als Fachmann auf diesem Gebiet. So hatte ihn die "Berliner Physikalische Gesellschaft" zusammen mit E.du Bois-Reymond und L.Wilhelmy in einen Ausschuß gewählt, der die Arbeiten begutachten sollte, die sich um den Preis bewarben, der 1855 für die experimentelle Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents ausgeschrieben worden war. Clausius verfaßte den Bericht über die einzige eingegangene Arbeit.⁷⁷

In der neuen, beruflich besser gesicherten Position, zuerst mit einem Vertrag für 10 Jahre, ab 1857 zeitlich unbegrenzt⁷⁸, fand er nun in Krönigs Aufsatz eigene Ideen zur Wärme wieder. Das war für ihn der Anstoß, seine schon vorgeformten Gedanken jetzt auch zu formulieren. In einem 1857 allgemeinverständlich gehaltenen Vortrag in Zürich zeigte er noch etwas deutlicher als in der folgenden Publikation, wie er seine Vorstellungen von frei beweglichen Molekülen im gasförmigen Aggregatzustand mit anderen Naturerscheinungen in Zusammenhang zu bringen wußte.⁷⁹ Die Analogien von Wärme- und Lichtstrahlen waren für ihn ein wichtiger Ausgangspunkt. Die Moleküle wurden nach seiner Interpretation durch Wellen, die er als Ätherschwingungen ansah, ähnlich wie ein makroskopischer Körper durch Schallwellen, zum Mitschwingen angeregt und erfuhren so eine Vermehrung der Bewegung. Damit machte er die Erwärmung durch Strahlung plausibel. Was bei Krönig nur als

isolierter Ansatz erschien, mit dem sich bekannte Eigenschaften auf einfache Weise berechnen ließen, fügte sich bei Clausius in ein allgemeines Konzept über die Wärme und die Aggregatzustände ein.

Sein Aufsatz in den "Annalen" war offenbar für eine möglichst breite Leserschaft gedacht, denn sein in 20 Punkte gegliederter Aufsatz behandelte die mathematisch-quantitativen Fragen erst in den letzten 7 Abschnitten, die nach der Überschrift "Mathematische Zusätze" folgten.⁸⁰ Er deutete an, daß der vermutlich rasch geschriebene Artikel noch nicht alles enthalte, wobei er sich "eine vollständigere Auseinandersetzung für später vorbehalte."⁸¹ In einer Fußnote fügte er an, durch Wilhelm Siemens⁸² schon vor längerer Zeit, wahrscheinlich bei einem Treffen der "Berliner Physikalischen Gesellschaft", erfahren zu haben, daß auch J.Joule bereits ähnliche Ideen publiziert habe. Die entsprechende Abhandlung war Clausius jedoch nicht zugänglich, und er wünschte sich deshalb eine Bekanntmachung in einer verbreiteteren Zeitschrift.⁸³

Die Druckformel leitete er unter etwas allgemeineren Voraussetzungen ab, als es Krönig getan hatte. So ließ er unelastische Stöße der Moleküle gegen die Wand zu. Auf die Art der Berechnung wirkte sich das allerdings nicht aus. Ganz ähnlich wie Krönig argumentierte Clausius hier mit den Regeln der Wahrscheinlichkeit.⁸⁴ Die große Anzahl der Teilchen sollte dafür sorgen, daß sich die Abweichungen vom elastischen Verhalten gegenseitig kompensierten. Ebenso blieb die Zulassung verschieden großer Geschwindigkeiten ohne praktische Konsequenz, da Clausius in allen Betrachtungen einen Mittelwert benutzte. In einem quaderförmigen Gefäß wählte er den Abstand X zweier paralleler Wände der Fläche F klein gegen die übrigen Dimensionen. So konnte er Effekte der

Seitenwände außer acht lassen.** Für die Rechnung sah Clausius von Stößen zwischen den Molekülen ab. Diese trafen nicht nur senkrecht, sondern unter einem beliebigen Winkel ϑ , den die Flächennormale mit der Bewegungsrichtung bildete, auf die Wand. Die Anzahl der Stöße eines Moleküls der Geschwindigkeit v pro Zeiteinheit war dann $v \cos \vartheta / 2X$. Jede Richtung sollte mit gleicher Wahrscheinlichkeit vorkommen. Deshalb befanden sich $n \sin \vartheta d\vartheta$ Teilchen im Intervall $[\vartheta, \vartheta + d\vartheta]$, wenn n die Gesamtzahl bezeichnet. Auf die Wand wurde die senkrechte Komponente des Impulses übertragen: $2mv \cos \vartheta$. Schließlich ergab die folgende Integration über den Winkel ϑ den gesuchten Druck:

$$p = (1/F) \int_0^{\pi/2} (nmv^2/X) \cos^2 \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = (1/3) (nmv^2/V) \quad (1.2.3)$$

Clausius erhielt also das Ergebnis Krönigs (1.2.1). Der Vergleich mit dem Gasgesetz $pV = T \text{ const.}$ führte wieder auf die Proportionalität von absoluter Temperatur und kinetischer Energie der Translationsbewegung der Moleküle $K = \frac{1}{2}nmv^2$. Durch Auflösen der Gleichung (1.2.3) nach v konnte Clausius die mittleren Geschwindigkeiten berechnen. Es ergaben sich bei 0°C für Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff in Metern pro Sekunde die Zahlen 461, 492 und 1844. Clausius kommentierte diese hohen Werte nicht weiter. Aus einer thermodynamischen Beziehung leitete er das Verhältnis von K zur Gesamtenergie H ab. Mit $nm = M$ gilt:

$$H = c_v MT \quad (1.2.4)$$

Hier ist c_v die spezifische Wärme bei konstantem Volumen. Man nannte sie damals auch die wahre spezifische Wärme. Unter konstantem Druck wird ein Teil der Wärme für die Expansionsarbeit verbraucht:

$$dH = c_v M dT + p dV = c_p M dT \quad (1.2.5)$$

Mit c_p wird die spezifische Wärme bei konstantem Druck bezeichnet. Wenn $p = \text{const.}$, folgt aus $pV = T \text{ const.}$ die Relation $dV = VdT/T$. Eingesetzt in (1.2.5):

$$H = c_p pV / (c_p - c_v) \quad (1.2.6)$$

Der Vergleich mit K liefert:

$$K/H = 3/2 (c_p/c_v - 1) \quad (1.2.7)$$

Mit dem bekannten Wert $c_p/c_v = 1,421$ für Gase wie Luft, Sauerstoff oder Wasserstoff fand Clausius dann $K/H = 0,6315$. Die Energie der Translationsbewegung ist also nicht gleich der Gesamtenergie. Die Moleküle müssen daher noch innere Freiheitsgrade besitzen. Clausius nannte dies "die Bewegungen der Bestandteile".⁸⁶ Darunter stellte er sich Rotationen des gesamten Moleküls und Schwingungen der einzelnen Atome innerhalb des Moleküls vor. Die Energien der verschiedenen Bewegungsarten sollten in einem festen Verhältnis zueinander stehen. Das stimmte nach (1.2.7) mit der von Clausius schon 1850 vertretenen Ansicht von der Konstanz der spezifischen Wärmen überein. Damals schienen die Experimente dem noch zu widersprechen.⁸⁷ Erst die Messungen von Regnault aus dem Jahr 1853 hatten eine Bestätigung gebracht.⁸⁸

Clausius formulierte nun drei Bedingungen, denen die Moleküle eines Gases genügen müssen, damit die Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac streng erfüllt sind, das Gas also "ideal" ist:

- 1) Der von den Molekülen eingenommene Raum ist vernachlässigbar klein gegen das Gasvolumen.
- 2) Die Zeit des Stoßvorgangs zweier Moleküle bzw. zwischen Molekül und einer Wand ist verschwindend klein gegen die Zeit zwischen zwei Stößen.
- 3) Der Einfluß der Molekularkräfte ist verschwindend klein.

Krönig hatte lediglich den zweiten Punkt erwähnt. Clausius betrachtete offenbar den letzten als den wichtigsten, denn er berichtete von dem vergeblichen Versuch, aus der Art der Abweichungen vom idealen Gaszustand Aussagen über die Molekularkräfte zu gewinnen. Die drei Aggregatzustände waren für ihn ein Ausdruck unterschiedlicher Molekülbeweglichkeiten. Während die Teilchen im festen Körper um feste Gleichgewichtslagen oszillierten, konnten sie sich in der Flüssigkeit aus ihrer Lage fortbewegen. Die anziehenden Molekularkräfte wurden aber erst im Gas völlig überwunden. In diesem Zusammenhang entwickelte er ein neues Konzept des Verdampfungsvorgangs, den er als dynamischen Gleichgewichtszustand beschrieb.⁹⁹ Es gelang ihm nicht, die Abhängigkeit des Dampfdrucks von der Temperatur zu berechnen. So blieb es bei einer qualitativen Aussage über die Druckabhängigkeit des Siedepunkts. Die Prozesse, in denen Arbeit und Wärme ineinander umgewandelt wurden, fand Clausius verträglich mit dem Konzept der kinetischen Gastheorie. Zu den Beispielen gehörte der Überstromversuch, bei dem sich die anfangs unterschiedlichen Dichten in zwei Gasbehältern nach Herstellung einer Verbindung ausgleichen. Im Fall eines idealen Gases kommt es insgesamt zu keiner Änderung der Wärmemenge. In dem Gefäß mit abnehmender Dichte sinkt jedoch die Temperatur, da das Gas dort gegen die angrenzenden Gasmassen Arbeit verrichtet, während es in dem anderen Gefäß eine entsprechende Erwärmung gibt. Die letzten Abschnitte des nichtmathematischen Teils beschäftigten sich mit der Änderung der Volumina von Gasen, die chemische Verbindungen eingehen. Clausius glaubte zunächst, Gase wie Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff wären einatomig. Das führte zusammen mit dem von Krönig abgeleiteten Satz von Avogadro auf Widersprüche. Unter sonst gleichen Bedingungen mußte aus je einer Volumeneinheit Stickstoff und Sauerstoff

eine Volumeneinheit Stickstoffmonoxid entstehen, denn die Teilchenzahl würde sich halbieren. Tatsächlich waren es aber zwei Volumeneinheiten. Daraus schloß Clausius, daß bereits die Moleküle der Ausgangsstoffe aus mehreren Atomen bestehen. Dieses Ergebnis war jedoch keineswegs neu.⁹⁰

Clausius konnte den Krönigschen Ansatz physikalisch plausibler machen. Durch den Zusammenhang mit den verschiedenen Aggregatzuständen und ihren Umwandlungen gewann das Konzept eine gewisse Anschaulichkeit. In den quantitativ faßbaren Ergebnissen ging er, abgesehen von der Einführung der inneren Freiheitsgrade, über Krönig nicht hinaus.

Das zunehmende Interesse an der Gastheorie zeigte sich in Besprechungen⁹¹ und in Details wie dem von Paul du Bois-Reymond veranlaßten Nachdruck einer Arbeit von D. Bernoulli aus dem Jahr 1738 über dieses Thema in den "Annalen".⁹² Der Hinweis auf eine derartige Traditionslinie war vor allem zur Stützung einer erfolgversprechenden Idee erwähnenswert.⁹³ Die nächste Publikation von Clausius, die 1858 Ideen aus der Gastheorie aufgriff, behandelte den chemischen Aufbau des Ozons.⁹⁴ Neue experimentelle Ergebnisse⁹⁵ führten ihn zu der ausdrücklich als Hypothese deklarierten Ansicht, Ozon sei einatomiger Sauerstoff. Seinem Berliner Kollegen P. T. Riess sandte er diesen Aufsatz nebst einem Brief, in dem er einräumte, daß der häufige Gebrauch von Hypothesen auch für ihn nicht ganz befriedigend sei: "Sie [seine Abhandlung] enthält wieder eine Hypothese, und ich fürchte, daß Sie, der Sie die Hypothesen nicht lieben, auch von dieser nicht sehr erbaut sein werden. Ich muß selbst gestehen, daß mir vor der Anhäufung meiner eigenen Hypothesen anfängt etwas bange zu werden, denn ich liebe es auch mehr, Schritt für Schritt in fest begründeten Schritten vorwärts zu gehen, als solche Luftsprünge zu machen. Aber es heißt

bei diesen Dingen auch, wer A gesagt hat, muß auch B sagen. Nachdem ich einmal meine Ansicht über die Konstitution der Gase ausgesprochen hatte, lag die Erweiterung auf das Ozon so nahe, daß ich dachte, wenn ich sie nicht ausspräche, würde es doch bald ein anderer tun."**

1.3 Die Diskussion über die neue Gastheorie -

Clausius' Formulierung des Konzepts der mittleren freien Weglänge

Der niederländische Wissenschaftler C.H.D.Buys-Ballot korrespondierte 1857 mit Clausius über die Gastheorie.¹ Buys-Ballots Name ist noch heute mit dem von ihm gerade zu jener Zeit aufgestellten Gesetz verbunden, das die Richtung des Windes relativ zu den Isobaren angibt. Neben Mineralogie, Geologie und Mathematik lehrte er auch theoretische Chemie in Utrecht.² Das motivierte ihn, sich mit der Molekularphysik zu beschäftigen.³ Clausius wollte diese private Diskussion offenbar bewußt an die Öffentlichkeit tragen, denn er forderte Buys-Ballot zur Publikation der vorgebrachten Einwände auf.⁴ Auf der Naturforscherversammlung 1857 in Bonn referierte Buys-Ballot seine Gedanken hierzu unter dem Titel "Das Wesen der Electricität und Wärme".⁵ In den "Annalen" erschien bald darauf eine ausführlichere Fassung.⁶ Er sah darin eine Gelegenheit, Argumente aus einer früheren, nur in holländischer Sprache erschienenen Arbeit zu wiederholen.⁷ Den sich geradlinig bewegenden Atomen setzte er im Sinn der Vibrationstheorie Oszillationen um eine Gleichgewichtslage entgegen. Er konnte mit dem ausgeprägten Beharrungsvermögen von Rauch- und Gasteilchen ein empirisches Faktum anführen, das mit den hohen Molekülgeschwindigkeiten, die Clausius berechnet hatte, unvereinbar schien. Seine anderen Vorbehalte gegen die Gastheorie waren von geringerer Qualität. So glaubte er, bei der Erklärung der Wärmestrahlung auf Widersprüche zu stoßen. Deren Frequenz hing nach seiner Ansicht mit derjenigen von Molekülschwingungen zusammen. Als eine solche betrachtete er auch die periodische Translationsbewegung eines Moleküls zwischen zwei gegenüberliegenden Gefäßwänden. Dann müßte sich die Frequenz der Wärmestrahlung mit dem Abstand der Gefäßwände ändern. Das

stand jedoch im Gegensatz zur Erfahrung. Clausius wies dagegen auf die inneren Freiheitsgrade und auf eine mögliche Verbindung dieser Bewegungen mit der Strahlung hin. Sein Ansatz lieferte keine Erklärung, bildete hierfür aber auch kein Hindernis.⁸ Die Darlegung von Buys-Ballots eigenen Ansichten über die Vibrations-theorie war wenig überzeugend und fand keine positive Resonanz.⁹

Fast zur gleichen Zeit und offenbar noch ohne Kenntnis von Buys-Ballots Veröffentlichung formulierte der Berliner Privatdozent für Mathematik Reinhold Hoppe¹⁰ seine Bedenken gegen die Gastheorie, die er im folgenden Band der "Annalen" publizierte.¹¹ Etwa ein Jahr zuvor hatte Hoppe ein technisches Detail von Clausius' mechanischer Wärmetheorie von 1850 kritisiert¹², was eine Entgegnung von Clausius¹³ und wiederum eine Replik von Hoppe¹⁴ ausgelöst hatte. Insoweit waren die beiden bereits aufeinander aufmerksam geworden. Hoppe nahm ausschließlich große Zustimmung für Krönigs Gastheorie wahr und konstatierte das Fehlen einer gründlichen Kritik. Die Erweiterungen von Clausius gegenüber Krönig berührten nach seiner Ansicht die entscheidenden inneren Widersprüche nicht, weshalb er sich vornehmlich mit Krönigs Arbeit auseinandersetzte. Unter der Voraussetzung, daß es keine inneren Bewegungen gab, berechnete er die Geschwindigkeit der Luftmoleküle.¹⁵ Das Ergebnis von 609 Metern pro Sekunde war viel zu groß, um die relativ lange Zeit zu erklären, die ein Gas zum Entweichen aus einem Gefäß benötigte. Ähnlich argumentierte schon Buys-Ballot. Außerdem erwähnte Hoppe die langsame Wärmeleitung in der Luft¹⁶, die ebenfalls mit solchen Molekülgeschwindigkeiten unvereinbar wäre. Die Existenz lokaler Temperaturen in einem Gas erschien ihm bei einer ungehinderten, geradlinigen Ausbreitung der Gasteilchen überhaupt nicht möglich. Allerdings erkannte er einen Freiraum in Krönigs Hypothese. Sie enthielt

keine Aussage über die Länge des geradlinigen Wegstücks des Moleküls zwischen zwei Stößen. Diesen Punkt präziserte Hoppe, um zu zeigen in welcher Weise die Theorie mit den erwähnten Phänomenen in Einklang gebracht werden könnte. Die Abschnitte der geradlinigen Bewegung müßten demnach in kurzen, unregelmäßigen Intervallen durch den Einfluß der Molekularkräfte unterbrochen werden. Aber auch die so modifizierte Idee von Krönig lehnte er wegen des dabei notwendigen Gebrauchs der Wahrscheinlichkeitsrechnung ab.¹⁷ Es bedeutete für ihn einen Verzicht auf die Berechenbarkeit der Natur und das "hieße an der befriedigenden Lösung des Problems [zu] verzweifeln."¹⁸ Deshalb betrachtete er die Vibrationstheorie, bei der die Moleküle um eine Ruhelage oszillierten, als die sinnvollere Alternative. Für eine Untersuchung der Moleküleigenschaften fand er die Gase gar nicht besonders geeignet. Er meinte, eher aus der wohlgeordneten Struktur der Kristalle Aussagen über Ort, Masse und Kraft der Moleküle ableiten zu können.

Kurz nach dem Erscheinen dieser Arbeit im Juniheft 1858 reichte Clausius seine Antwort bei den "Annalen" ein. Sie war mit dem 14.8.1858 datiert.¹⁹ Einen Monat später reiste er zur Naturforscherversammlung nach Karlsruhe. Er wollte mit seinem Vortrag vom 18.9.1858 auch dieses Forum für die Vorstellung seines neuen Konzepts der mittleren freien Weglänge nutzen.²⁰ Es ging darum, den Widerspruch zwischen den hohen Molekülgeschwindigkeiten und der relativ langsamen Ausbreitung der Gase zu beseitigen. Clausius griff Hoppes Idee von den kurzen, geradlinigen Wegstrecken auf und verknüpfte sie mit Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen. Dazu führte er eine Wirkungssphäre der Moleküle ein (vgl.S.17), deren Radius s gerade so gewählt wurde, daß im Innern abstoßende und außerhalb anziehende, mit der Entfernung abnehmende Molekularkräfte wirkten.

Bei der Annahme von anziehenden Kräften stützte sich Clausius auf die Experimente von Joule und Thomson, die eine Abkühlung von Gasen bei freier Expansion gefunden hatten.²¹ Die mittlere freie Weglänge war dann durch die Strecke gegeben, die "sich das Molecül durchschnittlich bewegen kann, bis sein Schwerpunkt einmal in die Wirkungssphäre eines anderen Molecüles kommt."²² Für die Berechnung benützte er eine technische Vereinfachung, indem er die Bewegung eines Moleküls gegenüber in Ruhe verharrenden Teilchen betrachtete und dies durch späteres Hinzufügen eines Faktors 3/4 wieder korrigierte. Über diese Zahl kam es später zu einer Kontroverse mit Maxwell.²³ Für die Wahrscheinlichkeit W , daß ein Teilchen die Strecke x frei durchläuft, setzte Clausius: $W(x) = e^{-\alpha x}$. Die Unbekannte α bestimmte er aus einfachen geometrischen Beziehungen zu $\alpha = ns^2/\lambda^3$, wobei λ der mittlere Teilchenabstand war. Dies erinnert an ähnliche Überlegungen, die er schon früher bei der Lichtstreuung angestellt hatte. Dort ging es um die Schwächung eines Lichtstrahls, die in gleicher Weise durch eine Exponentialfunktion dargestellt wurde.²⁴ Jeder frei durchlaufenen Weglänge ist nun eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Der Mittelwert, also die mittlere freie Weglänge l , folgt aus der Integration:

$$l = \int_0^{\infty} e^{-\alpha x} \alpha x \, dx = 1/\alpha \quad (1.3.1)$$

Damit ergibt sich für W :

$$W(x) = e^{-x/l} \quad (1.3.2)$$

Unter Berücksichtigung des erwähnten Korrekturfaktors erhält man die mittlere freie Weglänge:

$$l = (3/4) \lambda^3 / ns^2 \quad (1.3.3)$$

Dies ist nur eine Beziehung zwischen drei unbekannten Größen. Clausius schrieb sie in der Form $l/s = \lambda^3 / (\frac{1}{4} ns^2)$, was ihm eine

anschauliche Interpretation ermöglichte: "Die mittlere Weglänge eines Moleküls verhält sich zum Radius der Wirkungssphären wie der von dem Gase im ganzen eingenommene Raum zu dem Teil des Raumes, welcher von den Wirkungssphären der Moleküle wirklich ausgefüllt wird."²⁵ Mit dem Wert 1000 für $1/s$, den Clausius möglicherweise deshalb wählte, weil dies ungefähr dem Dichteverhältnis von Eis zu Wasserdampf entspricht, ergab sich $l = 62 \lambda$. Da λ sehr klein sei, müsse dies auch für 1 gelten, argumentierte Clausius. Eine konkrete Beziehung zu beobachtbaren Größen ließ sich so aber nicht herstellen. Schließlich sah er es noch als notwendig an, die geringe Wahrscheinlichkeit für freie Weglängen, die ein Vielfaches des Mittelwerts sind, durch konkrete Zahlen zu untermauern. Vielleicht war dies eine Reaktion auf vermutete Schwierigkeiten von Kollegen, die Bedeutung eines wahrscheinlichen Ereignisses zu verstehen. In den letzten Abschnitten, die bei einer späteren englischen Übersetzung fehlten²⁶, ging Clausius auf weitere Einwände von Buys-Ballot und Hoppe ein. So glaubte er sich mit seiner Arbeit nicht mehr im Widerspruch zur Existenz lokaler Temperaturen in einem Gas. Wie sich jedoch bald herausstellte, bedurfte das Phänomen noch weiterer Klärung.

Emil Jochmann, Lehrer am Cöllnischen Realgymnasium in Berlin und ab 1861 in der mittelbaren Nachfolge von Krönig Schriftleiter bei den "Fortschritten der Physik", griff das Thema 1859 wieder auf. Zunächst in einem Vortrag an seiner Schule, der auch als Broschüre erschien²⁷, und dann, offenbar als Ergebnis einer Korrespondenz mit Clausius, in einer Publikation in den "Annalen"²⁸. Dabei wies er auf einige immer noch ungeklärte Fragen hin. Durch ein eindimensionales Analogon zeigte er, daß eine geradlinige Bewegung der Gasteilchen auch mit dem Konzept der mittleren freien Weglänge eine zu rasche Wärmeleitung zur Folge hätte. Dabei ging Jochmann

von Kugeln aus, die sich auf einer Geraden zentral und elastisch stoßen sollten. Sie legten zwar nur den Abstand bis zu ihrem Nachbarn zurück, aber die Geschwindigkeit, also die Wärme, pflanzte sich ebenso schnell fort wie bei der freien Bewegung einer einzelnen Kugel. Außerdem fehlte eine mikroskopische Erklärung für die Einstellung des thermischen Gleichgewichts.²⁹ Im Sinn der Gastheorie müßte es durch elastische Stöße zur Angleichung der mittleren kinetischen Energien der Moleküle kommen. Weiterhin sah Jochmann keine Erklärungsmöglichkeit für die bei einem Überstromversuch auftretenden Temperaturveränderungen. Makroskopisch hatte Clausius dies schon behandelt (s.S.25).³⁰ Eine Veränderung der in beiden Gefäßen gleichen mittleren Molekulargeschwindigkeiten blieb jedoch unverständlich.³¹ Auch die Erklärung der Schallausbreitung war problematisch. Helmholtz wies gleichfalls auf diesen Punkt hin und äußerte sich zwar unbestimmt, aber optimistisch für die kinetische Gastheorie.³² Subjektive Einschätzungen spielten durchaus eine Rolle. Bei Jochmann zeigte sich dies am Ende seines Beitrags. Offenbar war die Abneigung gegen den Gebrauch der Wahrscheinlichkeitsrechnung in der Physik der Anstoß für die Formulierung seiner Einwände gewesen: "Man könnte also höchstens zu einer Art von Wahrscheinlichkeitsschlüssen seine Zuflucht nehmen, welche an sich schon nicht diejenige Evidenz bieten, die wir sonst beim Beweise mechanischer Sätze verlangen."³³

Hoppe meldete sich im folgenden Jahr nochmals zu Wort.³⁴ Er führte wiederum die Wärmeleitung und die Schallausbreitung als Erscheinungen an, die mit der Hypothese der Gastheorie nicht erklärt werden könnten. Neu war sein Versuch, verschiedene Ansichten über die Gase mit einem Naturvorgang, der bekannten atmosphärischen Temperaturabnahme bei wachsender Höhe, quantitativ zu vergleichen.

Die Schwierigkeit des Problems ließ eine Entscheidung allerdings nicht zu. Hoppe wies aber damit auf fehlende experimentelle Bestätigungen hin.

Clausius reagierte 1862 mit einer Theorie der Wärmeleitung.³⁵ Er konnte zeigen, daß jenes eindimensionale Analogon von Jochmann keine zutreffende Beschreibung der tatsächlichen Situation darstellte. Mittlerweile hatte auch Maxwell über dieses Thema gearbeitet (s.Abschnitt 2.1).³⁶ Clausius behielt sich zwar Antworten auf die anderen Fragen vor, kam aber doch nicht mehr darauf zurück. Die Angleichung der kinetischen Energien beim thermischen Gleichgewicht wurde von Maxwell behandelt (s.S.37).³⁷ Zur Schallgeschwindigkeit äußerte sich zuerst Stefan 1863.³⁸ Er fand den Wert der Newtonschen Formel durch Multiplikation der Molekulgeschwindigkeit mit $1/\sqrt{3}$. Das begründete er damit, daß nur jeweils ein Drittel der Bewegungsenergie der Moleküle auf eine bestimmte Richtung entfiel. Die Vorgänge beim Überstromversuch, an die Jochmann 1864 nochmals erinnerte³⁹, wurden quantitativ erst 1889 von L.Natanson geklärt.⁴⁰ Dabei ging nicht nur eine Durchschnittsgeschwindigkeit, sondern die Art der Geschwindigkeitsverteilung in die Untersuchung ein.

Zu Beginn der sechziger Jahre gab es also viele offene Probleme, aber noch keine Vorhersagen neuer Effekte. Die Behandlung der schon angesprochenen Wärmeleitung und der anderen Transportphänomene sollte in dieser Hinsicht bald zu einem Erfolg führen. Clausius hat neben seinen fachlichen Beiträgen das Verdienst, die Gastheorie zu jener Zeit immer wieder in die Diskussion gebracht zu haben. Dies geschah durch teilweise von ihm herausgeforderte Kontroversen sowie durch Stellungnahmen zu Veröffentlichungen anderer Autoren, selbst wenn es nur galt, auf elementare Fehler hinzuweisen.⁴¹

2. Die Reibung in der Hydrodynamik und der kinetischen Gastheorie

2.1 Die erste Arbeit von J.C. Maxwell zur kinetischen Gastheorie

Die Untersuchung von Clausius über die mittlere freie Weglänge erschien im Februar 1859 im Philosophical Magazine in englischer Übersetzung.¹ Dadurch wurde J.C. Maxwell, der seit 1856 in Aberdeen eine Professur für Naturphilosophie² innehatte³, auf diesen Problemkreis aufmerksam.⁴ Während Clausius seine Ideen im Zusammenhang mit thermodynamischen Prozessen, wie den Umwandlungen der Aggregatzustände, entwickelt hatte und so von den makroskopischen auf die mikroskopischen Vorgänge zu schließen versuchte, ging Maxwell von den elementaren Teilchen aus, die als harte und elastische Kugeln nur durch Stöße miteinander wechselwirken sollten. Mit dieser Hypothese und den Gesetzen der Mechanik formulierte er eine dynamische Theorie der Gase. Unter Dynamik verstand er, dem heutigen Sprachgebrauch entsprechend, die Beziehungen zwischen Kräften und Bewegungen. Neben der Statik, Kinematik und der neuen Energetik, womit er die Aufdeckung physikalischer Zusammenhänge durch das Prinzip von der Erhaltung der Energie meinte, bildete sie in seiner Einteilung einen der vier Zweige der Mechanik.⁵ Bereits im Mai 1859 erbrachten seine Berechnungen neue Ergebnisse.⁶ Der mikroskopische Zugang führte ihn auf eine gemeinsame Grundlage der drei verschiedenen Transportvorgänge in den Gasen: der inneren Reibung, Diffusion und Wärmeleitung. Es gab aber nur wenige Experimente, mit denen Maxwell die daraus abgeleiteten Aussagen hätte vergleichen können. Er wußte nur von denen Grahams zur Diffusion⁷ und von einer Bestimmung des Reibungskoeffizienten der Luft durch Stokes⁸. Die Messung der Wärmeleitung schätzte Maxwell wegen des sich überlagernden Effekts der Wärmestrahlung als sehr schwierig ein.⁹ So blieb es ungewiß, inwieweit

die Resultate der Theorie mit den realen Naturvorgängen übereinstimmten. Besonders erstaunlich fand Maxwell seine Folgerung, daß die Reibung druckunabhängig sein sollte. Er fragte Stokes deshalb nach einer möglichen Widerlegung.¹⁰ Aber selbst für diesen Fall sah er seine Arbeit noch als sinnvoll an. Abgesehen von dem Beweis der Unrichtigkeit des Modells von Clausius, hätte er dann zumindest eine in sich abgeschlossene Übung in Mechanik durchgeführt.¹¹ In einer offiziellen Ansprache betonte er im folgenden Jahr ganz allgemein den Wert jedes mechanischen Ansatzes zur Erklärung der Phänomene von Elektrizität und Wärme.¹² Die Erscheinungen der Wärmeleitung und der Diffusion waren qualitativ bereits früher erörtert worden (vgl. Abschnitt 1.3). Die Behandlung der Reibung stellte dagegen eine Erweiterung des Anwendungsbereichs von Clausius' Konzept dar. Vermutlich hatten die Arbeiten von Stokes über die innere Reibung von Flüssigkeiten und Gasen Maxwell Anregungen hierzu vermittelt.¹³

Im September 1859 trug er bei dem Treffen der "British Association for the Advancement of Science" (BAAS) die Ergebnisse seiner Arbeit über die Gase stichwortartig vor.¹⁴ Parallel und zeitweise vordringlich beschäftigte er sich damals mit optischen Untersuchungen¹⁵, weshalb seine Gasttheorie erst in den Ausgaben vom Januar und Juli 1860 im "Philosophical Magazine" erschien.¹⁶ Sie war in drei Kapitel mit insgesamt 23 Theoremen aufgeteilt. Das erste Kapitel schloß mit der im 13. Theorem erörterten inneren Reibung ab, das zweite behandelte die Diffusion sowie die Wärmeleitung und das dritte zeigte die Gleichverteilung der Energie auf die einzelnen Freiheitsgrade der Rotation und der Translation. Die Erläuterungen zu den Rechnungen waren äußerst knapp gehalten.¹⁷ In den ersten drei Theoremen entwickelte Maxwell die Mechanik des nichtzentralen Stoßes. Anders als beim zentralen Stoß kommt es

hier auch im Fall gleicher Massen und gleicher Geschwindigkeiten zu Änderungen der Geschwindigkeitsbeträge. Daher könnte ein Zustand, in dem alle Moleküle die gleiche Geschwindigkeit haben, nicht stationär sein. Maxwell gab dann eine Geschwindigkeitsverteilung an, die er als Lösung einer Funktionalgleichung erhielt. Dabei setzte er die Unabhängigkeit der drei orthogonalen Geschwindigkeitskomponenten und eine gleiche Wahrscheinlichkeit für jede Bewegungsrichtung voraus. Es wird vermutet, daß die so erhaltene Normalverteilung Maxwell von der Fehlerrechnung bekannt war und es sich eigentlich weniger um eine Herleitung als vielmehr um eine Rechtfertigung eines gewünschten Resultats handelte.¹⁰ Trotz dieses Ergebnisses verwendete er in fast allen Rechnungen lediglich eine Durchschnittsgeschwindigkeit, ohne dieses Vorgehen näher zu begründen.

Er nützte die Eigenschaften der Verteilungsfunktion nur bei zwei Theoremen aus. So zeigte er mit einer daraus abgeleiteten Aussage über den Mittelwert der Relativgeschwindigkeit zweier Teilchensysteme, daß sich deren mittlere kinetische Energien durch Stöße immer mehr angleichen müßten. Dies wäre die mikroskopische Erklärung für die Einstellung des thermischen Gleichgewichts gewesen. Maxwell verwendete jedoch sehr spezielle Bedingungen, wie die Orthogonalität der beiden mittleren Geschwindigkeiten sowohl vor als auch nach dem Stoß. Er war sich dessen offenbar gar nicht bewußt, denn er glaubte, einen allgemeinen Beweis gefunden zu haben.¹¹ Außerdem ging die Verteilungsfunktion in die Formel für die mittlere freie Weglänge l ein. Es ergab sich:

$$l = 1/(\sqrt{2} Nns^2) \quad (2.1.1)$$

Dabei ist N die Teilchenzahl pro Volumeneinheit und s der Abstand zweier Teilchen beim Stoß. Statt des Faktors $1/\sqrt{2}$ hatte Clausius $3/4$ erhalten (vgl. 1.3.3). Die beiden Zahlen unterscheiden sich

nur wenig und deuten die geringen Veränderungen der Ergebnisse an, die durch die Berücksichtigung der Verteilungsfunktion verursacht werden. Aber Clausius erkannte gar nicht, daß hierin der Grund für die Abweichung von seiner Formel lag.

Bei der Berechnung des Gasdrucks brauchte sich Maxwell, anders als Krönig oder Clausius, auf keine bestimmte Form des Gasbehältnisses zu beziehen. Genausowenig benötigte er die Vorstellung von den störungsfrei sich hin- und herbewegenden Teilchen, weil er mit dem Konzept der mittleren freien Weglänge formaler vorgehen konnte. Die Zahl der Stöße der von einer Schicht dz ausgehenden Teilchen ist pro Zeit- und Flächeneinheit $N dz v/l$. Wenn n die Vielfachen der freien Weglängen bezeichnet, erreichen gemäß (1.3.2)

$$N dz (v/l) [e^{-n} - e^{-(n+dn)}] = N dz (v/l) e^{-n} dn \quad (2.1.2)$$

den Bereich zwischen nl und $(n+dn)l$. Von denen trifft der Anteil $(nl-z)/2nl$ auf eine Fläche in der Entfernung $z < nl$, denn dies ist das Verhältnis der Oberfläche des Kugelsegments der Höhe $nl-z$ zur Oberfläche der ganzen Kugel mit Radius nl .²⁰ Der Mittelwert über alle Geschwindigkeitskomponenten in z -Richtung ergibt sich aus:

$$\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\arccos(z/nl)} v \cos \sqrt{n^2 l^2 - z^2} \sin \sqrt{n^2 l^2 - z^2} d\varphi dn}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\arccos(z/nl)} n^2 l^2 \sin \sqrt{n^2 l^2 - z^2} d\varphi dn} = v (nl+z)/(2nl) \quad (2.1.3)$$

Damit wird von der Schicht dz pro Zeiteinheit auf eine Flächeneinheit in der Entfernung z der Impuls

$$mN v^2 e^{-n} (n^2 l^2 - z^2)/4n^2 l^3 dz dn \quad (2.1.4)$$

übertragen. Die Integration über z und n liefert den gesuchten Druck:

$$p = \int_0^\infty \int_0^{n_1} mN v^2 e^{-n} (n^2 l^2 - z^2) / (4n^2 l^3) dz dn = (1/3) mNv^2 \quad (2.1.5)$$

Die innere Reibung der Gase berechnete Maxwell für ein Gas, das mit der linear von z abhängigen Geschwindigkeit u in Richtung der x -Achse strömt:

$$u(z) = a + bz \quad (2.1.6)$$

Dabei sind a und b Konstanten. Alle Orte mit derselben z -Koordinate bilden demnach eine Schicht mit gleicher Geschwindigkeit. Maxwell führte die Reibung auf die Stöße der Teilchen zurück, die aufgrund der thermischen Bewegung eine andere Schicht erreichen und Impulse übertragen, die sich aus der Differenz der Schichtgeschwindigkeiten ergeben. Er bestimmte in diesem Sinn die Wechselwirkung aller Schichten, für die z positiv war, mit denjenigen, deren z negativ war. Dazu betrachtete er die Schicht der Dicke dz mit der Koordinate $z > 0$ und diejenige der Dicke dz' mit $z' < 0$. Maxwell berechnete die Zahl der Teilchen, die pro Zeiteinheit gerade die Distanz von z bis z' durchlaufen und dort einen Stoß ausführen. Von (2.1.2) interessiert deshalb der Anteil, der sein Wegende in der Schicht mit der Koordinate z' hat. Dies ist $dz'/(2nl)$, entsprechend dem Verhältnis der Oberfläche der von dieser Schicht ausgeschnittenen Kugelschicht $2\pi n l dz'$ zu der Oberfläche der gesamten Kugel mit Radius nl .²¹ Maxwell erhielt demzufolge für die Zahl der Stöße:

$$Nv/(2nl^2) e^{-n} dz' dz \quad (2.1.7)$$

Er setzte nun eine vollständige Übertragung des Impulsunterschiedes $mb(z-z')$ voraus. Die Wirkung von dz auf dz' ist daher:

$$Nmbv/(2nl^2) (z-z') e^{-n} dz' dz \quad (2.1.8)$$

Da der Abstand zwischen z und z' bei dieser Rechnung nicht größer als nl werden darf, erfolgt die Integration über z' in den Grenzen

von $z-nl$ bis 0 . Der Impulsübertrag pro Zeit- und Flächeneinheit, also die innere Reibung R , ergibt sich dann aus:

$$R = \int_0^{nl} \int_0^{nl} \int_{z-nl}^0 Nmbv/(2nl^2) (z-z') e^{-\alpha} dz' dz dn = (1/3) mNlvb \quad (2.1.9)$$

Bei Verwendung der Bezeichnungen $mN = \rho$ sowie $b = du/dz$ liefert der Vergleich mit der makroskopischen Formel $R = \mu du/dz$ einen Ausdruck für den Reibungskoeffizienten μ :

$$\mu = (1/3) \rho lv \quad (2.1.10a)$$

Durch Einsetzen von (2.1.1) kürzt sich die Dichte heraus:

$$\mu = mv/(3\sqrt{2} ns^2) \quad (2.1.10b)$$

Das ist nun das Maxwell so erstaunlich anmutende Ergebnis einer von der Dichte unabhängigen Reibung. Die Antwort von Stokes auf die eingangs geschilderte Anfrage nach einer Widerlegung ist unbekannt, aber Maxwell erwähnte in seiner Veröffentlichung im "Philosophical Magazine" ein nicht näher bezeichnetes Experiment, das (2.1.10b) nicht bestätigen würde.²² Wahrscheinlich handelte es sich um einen 1829 publizierten Versuch von Sabine, der die Schwingungen eines Pendels unter dem Einfluß verschiedener Gase beobachtet hatte.²³ Bezogen auf die Dichte fand Sabine beim Wasserstoff eine im Vergleich zur Luft mehr als doppelt so starke Wirkung. Er vermutete daher eine zur Flüssigkeitsreibung analoge stoffspezifische Eigenschaft der Gase, die außerdem der Dichte proportional zu sein schien. Unter dieser Voraussetzung erzielte Stokes 1850 eine befriedigende Übereinstimmung zwischen seiner Reibungstheorie und weiteren Experimenten.²⁴ Das wird er Maxwell mitgeteilt haben, der nun offenbar weitaus vorsichtiger und weniger optimistisch als in einem Brief des vergangenen Jahres war.²⁵ Die dort enthaltene anschauliche Interpretation des Resultats (2.1.10b) erwähnte er in seiner Publikation nicht mehr.

Danach blieb die Reibung auch bei geringer werdender Dichte konstant, weil die mittlere freie Weglänge und damit die Reichweite der Reibung zunahm, was die geringere Teilchenzahl gerade kompensierte. Maxwell setzte Stokes' Wert für μ von Luft in (2.1.10a) ein, was eine Berechnung der mittleren freien Weglänge ermöglichte: $l = 1/447000$ Zoll $\approx 5,6 \cdot 10^{-6}$ cm. Bei der im zweiten Kapitel folgenden Behandlung der Diffusion ergab sich unabhängig davon $l = 1/389000$ Zoll $\approx 6,4 \cdot 10^{-6}$ cm. Maxwell betrachtete dies, wie er an anderer Stelle äußerte, angesichts der nicht allzu genauen Experimente als eine hinreichend gute Übereinstimmung.²⁶

Im ersten Theorem des zweiten Kapitels stellte er eine Gleichung für den Materietransport q pro Zeit- und Flächeneinheit senkrecht zur z -Achse auf:

$$q = -(1/3) d(mNlv)/dz \quad (2.1.11)$$

Indem er hier die Masse m ganz formal durch die Energie eines Moleküls E ersetzte, glaubte er direkt den Wärmestrom J zu berechnen. Sicher motivierte ihn dabei auch die Analogie zur Reibung, denn der Austausch von m gegen den Impuls mu ergibt sofort (2.1.9). Das negative Vorzeichen bedeutet nur, daß der Impulsstrom in die Richtung der abnehmenden Geschwindigkeit weist. Für das Verhältnis der Gesamtenergie E zur Energie der Translationsbewegung wählte Maxwell die Abkürzung β , womit $E = \frac{1}{2}\beta mv^2$. Unter Verwendung von $(1/T) dT/dz = (2/v) dv/dz$, was aus der Proportionalität von T und v^2 folgt, und der Relation $p = (1/3) mNv^2$ (1.2.1) geht (2.1.11) über in:

$$J = -(3/4) (\beta lvp/T) dT/dz \quad (2.1.12)$$

Der Vergleich mit $J = -\kappa dT/dz$, liefert für den Wärmeleitungskoeffizienten κ den Ausdruck:

$$\kappa = (3/4) (\beta lvp/T) \quad (2.1.13)$$

Clausius machte später auf den prinzipiellen Fehler dieser

Herleitung aufmerksam.²⁷ Maxwells Ansatz beschrieb einen Energie-transport, der gleichzeitig mit einem Massentransport verknüpft war und insoweit nicht den eigentlichen Leitungsvorgang erfaßte. Im Fall der Reibung ist die transportierte Größe, die Translationsgeschwindigkeit, unabhängig von der thermischen Bewegung. Bei konstanter Temperatur treten dann in jedes feste Raumgebiet ebensoviele Teilchen ein wie aus. Anders dagegen die Situation innerhalb eines Temperaturgefälles. Die Träger des Transportvorgangs besitzen hier unterschiedliche Durchschnittsgeschwindigkeiten. Deshalb kann aus (2.1.11) zwar die Reibung, aber nicht die Wärmeleitung berechnet werden. Allerdings unterscheidet sich das Ergebnis von Clausius, der dies berücksichtigte, von (2.1.13) nur durch einen numerischen Faktor.²⁸

Im letzten Abschnitt erweiterte Maxwell die Theorie auf die Rotation der Teilchen. Bei einer nichtsphärischen Gestalt der Moleküle sollte es eine Wechselwirkung von Rotations- und Translationsbewegung geben. Daraus leitete er ab, daß auf jeden Freiheitsgrad der Translation und der Rotation im Mittel die gleiche Energie entfällt. Clausius hatte bereits einen Ausdruck für das Verhältnis von Translations- und Gesamtenergie gefunden (1.2.7). Maxwell kannte nun aufgrund seines Theorems dieses Verhältnis unter der stillschweigend gemachten Voraussetzung, daß es neben der Rotation keine anderen inneren Bewegungen gibt:

$$K/H = 1/2$$

(2.1.14)

Damit folgte aber aus (1.2.7) für das Verhältnis der spezifischen Wärmen $k = c_p/c_v = 1,33$, was von dem aus den Experimenten bekannten Wert $k = 1,408^{29}$ merklich abwich. Maxwell empfand dies als einen entscheidenden Widerspruch für die gesamte Theorie, die nach seiner Überzeugung alle Beziehungen mit beobachtbaren Größen exakt erfüllen mußte. Er hatte sich erst nach der Untersuchung der

Transportvorgänge mit dieser Frage beschäftigt, weshalb sein Vortrag vom September 1859 noch nichts dazu enthielt. In seinem ebenfalls vor der BAAS gehaltenen Referat vom Juni oder Juli 1860 betonte er um so deutlicher, daß dieses Ergebnis "die ganze Hypothese umstoße, so befriedigend die anderen Resultate auch sein mögen."³⁰ Seine so negative Einschätzung veränderte sich jedoch nach einiger Zeit, wie aus einem Anfang 1862 geschriebenen Brief an einen Studienfreund hervorgeht.³¹ Darin berichtete er, daß Stokes in den Transpirationsversuchen von Graham eine Bestätigung für die Druckunabhängigkeit der inneren Reibung gefunden habe. Offenbar davon ermutigt führte Maxwell die Frage der spezifischen Wärme nur noch als gleichgewichtiges Gegenargument an.

Seit 1860 lehrte er am King's College in London. Hier begann er 1863 und erneut 1865 zusammen mit seiner Frau, Experimente zur Überprüfung der Aussagen über die Reibung durchzuführen.³² Die Problematik war inzwischen auch in Deutschland von O.E.Meyer aufgegriffen worden.

2.2 Die Reibung in der Hydrodynamik

Durch die Einbeziehung der Reibung in die neue Gastheorie entstand eine Verbindung mit der entsprechenden Fragestellung in der Hydrodynamik. Untersuchungen über den inneren Widerstand einer Flüssigkeit waren schon um 1803 von Coulomb angestellt worden. Er beobachtete die Abnahme der Amplituden einer darin eingetauchten schwingenden Scheibe.¹ Diese Methode wurde jedoch erst um 1860 wieder aufgegriffen. Das Interesse an der Flüssigkeitsreibung konzentrierte sich zunächst auf die Strömung in engen Röhren. Da die Entstehung von störenden Turbulenzen hier weitgehend unterdrückt wird, liegt eine hinreichend gut reproduzierbare Experimentiersituation vor. Außerdem hatte dies für die Physiologie Bedeutung. So war es wohl die Beschäftigung mit Fragen des Blutkreislaufs, die J.L.M.Poiseuille den Anstoß zu seinen Messungen gab.² Er bestimmte gegen 1840 die Flüssigkeitsmenge, die pro Zeiteinheit einen Querschnitt in der Röhre passiert, und fand sie zur Differenz der Drücke an den Röhrenenden sowie zur vierten Potenz des Durchmessers proportional.³ Eine aus Arago, Babinet, Piobert und Regnault bestehende Kommission verfaßte einen Bericht darüber.⁴ Die Ursache für den sich der Strömung entgegenstellenden Widerstand sahen sie in einer zur Geschwindigkeit proportionalen Reibung zwischen der Flüssigkeit und der inneren Oberfläche der Röhre. Den von Poiseuille empirisch gefundenen Zusammenhang konnten sie damit jedoch nicht herleiten. Das schrieben sie dem Umstand zu, daß die in ihrer Rechnung vereinfachend als konstant angesetzte Geschwindigkeit von der Wandung zur Achse hin zunahm.⁵ Eine innere Reibung erwähnten sie nicht. Diesen Begriff verwendete G.Hagen in seiner ein Jahr zuvor erschienenen Arbeit über das gleiche Thema.⁶ Er beschrieb den Vorgang etwas allgemeiner. Neben

einem Widerstandsterm, der dem Gesetz von Poiseuille entsprach, berücksichtigte er noch eine Beschleunigung. Diese kam durch den von der Reibung nicht kompensierten Teil der Druckdifferenz zwischen den Röhrendenden zustande. Das Ergebnis erscheint deshalb weniger prägnant. Vielleicht war das ein Grund dafür, daß sein Name bei der Bezeichnung dieser Gesetzmäßigkeit dem von Poiseuille erst später hinzugefügt wurde.⁷ Hagen vermutete, daß die Geschwindigkeit mit dem Abstand von der Achse linear abnehmen würde. Die Wassersäule zerlegte er gedanklich in sehr dünne konzentrische Röhren. Nun führte er den Widerstandsterm auf die gegenseitige Verschiebung dieser Röhren, also auf eine Wechselwirkung innerhalb der Flüssigkeit, zurück. Die korrekte quantitative Formulierung gelang jedoch auch ihm nicht.

Stokes empfand den Zustand der Hydrodynamik bis 1845 als unbefriedigend. Sie erschien ihm als eine beziehungslose Aneinanderreihung von Erklärungen verschiedener Phänomene, die doch eigentlich auf den gleichen Ursachen beruhten. Er vermißte die Frage nach den zugrundeliegenden Naturgesetzen.⁸ Mit der Aufstellung einer allgemeinen Bewegungsgleichung für Flüssigkeiten meinte er daher, von zwei Beiträgen von Poisson und Navier abgesehen⁹, die ersten Ansätze in dieser Richtung formulieren zu haben. Die innere Reibung war für ihn eine Folge relativer Bewegungen der Flüssigkeitsteilchen. Er brachte dies qualitativ mit den Molekularkräften in Verbindung, die in Relation zu Gravitation und elektrostatischer Wechselwirkung als stark und kurzreichweitig galten. Das ging zwar nicht direkt in die Resultate ein, bildete aber wohl einen Hintergrund für die Überlegungen von Stokes. Unter Berücksichtigung der bei einer relativen Verschiebung der Teilchen hervorgerufenen Normaldrücke und Tangentialkräfte erhielt er schließlich die Bewegungsgleichungen:

$$\rho \left(\frac{du}{dt} - X \right) + \frac{dp}{dx} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.2.1a)$$

$$\rho \left(\frac{dv}{dt} - Y \right) + \frac{dp}{dy} - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.2.1b)$$

$$\rho \left(\frac{dw}{dt} - Z \right) + \frac{dp}{dz} - \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.2.1c)$$

Wiederum ist μ der Reibungskoeffizient. Es kam noch die Inkompressibilitätsbedingung hinzu:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2.1d)$$

Dabei sind (x,y,z) die kartesischen Koordinaten, (u,v,w) die Geschwindigkeitskomponenten und (X,Y,Z) die äußeren Beschleunigungen in diesen Koordinaten. Stokes benutzte nicht die Zeichen für die partielle Ableitung und schrieb für die totale Ableitung nach der Zeit "Du/Dt". In der Arbeit von Stokes folgt die Diskussion der Randbedingung. Die Flüssigkeitsschicht, die an einen festen Körper grenzt, sollte sich relativ zu diesem in Ruhe befinden. Andernfalls würden die durch die diskontinuierliche Geschwindigkeitsänderung entstehenden Tangentialkräfte zum sofortigen Verschwinden der Bewegung führen. Stokes konstatierte jedoch im Fall zylindrischer Röhren einen Widerspruch zwischen den damit berechneten Ausflußmengen und den Resultaten der Experimente von Bossut und Dubuat.¹⁰ Er lastete dies der vermeintlich falschen Randbedingung an. Die schon länger zurückliegenden Versuche schätzte er höher ein als seine Theorie. Erst später stellte sich heraus, daß diese Messungen an nicht turbulenzfreien Strömungen vorgenommen worden waren.¹¹ Die Ergebnisse von Hagen und Poiseuille kannte er dagegen nicht. Dennoch gab er die Berechnung des Geschwindigkeitsprofils in einer Röhre mit dem Radius R an, um der Lösung wenigstens ein Stück näher zu kommen.¹² Die Röhre schloß dabei mit der Horizontalen im Schwerfeld den Winkel α ein. Durch die schräge Lage war eine äußere Kraft vorhanden, welche die

Reibung überwand und die Flüssigkeit in Bewegung hielt. Die z-Richtung wurde parallel zur Röhrenachse gelegt, die x-Richtung senkrecht zur Schwerkraft gewählt. Die Strömungsgeschwindigkeit sollte nur eine stationäre z-Komponente besitzen, die nach (2.2.1d) dann nicht von z abhängt: $u=0$, $v=0$, $w=f(x,y)$. Daher sind (2.2.1a-d):

$$dp/dx = 0 \quad (2.2.2a)$$

$$dp/dy = \rho g \cos \alpha \quad (2.2.2b)$$

$$dp/dz = \rho g \sin \alpha + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.2.2c)$$

Stokes setzte $dp/dz = 0$:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \rho g \sin \alpha / \mu = 0 \quad (2.2.3)$$

Bei dem Übergang zu Zylinderkoordinaten (r, θ, z) kann die Symmetrie des Problems ausgenutzt werden. Da $\partial w / \partial \theta = 0$:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + (1/r) \frac{\partial w}{\partial r} + \rho g \sin \alpha / \mu = 0 \quad (2.2.4)$$

Mit der Bezeichnung $w(r) = U$ für die unbekannte Geschwindigkeit am Rand liefert die Integration der Differentialgleichung:

$$w(r) = (1/4\mu) \rho g \sin \alpha (R^2 - r^2) + U \quad (2.2.5)$$

Die Ausflußmenge pro Zeiteinheit ergibt sich dann aus der Integration der Geschwindigkeit über den Röhrenquerschnitt. Stokes führte dies in seiner Publikation nicht mehr aus, weil er aufgrund der oben erwähnten Experimente an einen Fehler in seinen Überlegungen glaubte. Andernfalls hätte er mit $U=0$ das Gesetz von Hagen-Poiseuille erhalten:

$$2\pi \int_0^R w(r) r dr = (1/8\mu) \pi \rho g \sin \alpha R^4 + \pi R^2 U \quad (2.2.6)$$

Um das Jahr 1860 gelang es drei Wissenschaftlern unabhängig voneinander, dafür eine Herleitung zu finden. Der Beitrag von E.Hagenbach-Bischoff¹³ ging aus einer Zusammenarbeit mit dem Basler Lehrstuhlinhaber G.Wiedemann hervor¹⁴, dem er auf dessen

Empfehlung hin 1863 in dieser Position nachfolgte¹⁵. Hagenbach beschäftigte sich ansonsten nicht mit der Hydrodynamik, aber hier sah er eine Verbindung zu grundlegenden Fragen. Nach seiner Ansicht beruhten die Fortschritte der Physik insbesondere auf genaueren Kenntnissen der Tatsachen, die mit dem molekularen Aufbau der Materie verknüpft waren. Unter diesem Aspekt wies er den Untersuchungen über Kohäsionserscheinungen¹⁶, zu denen die Zähigkeit der Flüssigkeiten gehörte, eine über das spezielle Problem hinausreichende Bedeutung zu. Das war Hagenbachs Ausgangspunkt für die experimentelle und theoretische Untersuchung über den Ausfluß bei zylindrischen Röhren. Von Hagen übernahm er die Vorstellung von den konzentrischen Flüssigkeitsröhren. Deren Wände sollten jetzt nur aus einer monomolekularen Schicht bestehen. Die Anzahl der Moleküle pro Längeneinheit bezeichnete er mit n . Der Abstand zweier benachbarter Schichten bzw. der zweier Moleküle war dann $1/n$. Die Reibung setzte er proportional zur relativen Geschwindigkeit benachbarter Röhren an. Durch Multiplikation mit ihrer Oberfläche und einem Faktor k sollte sich die auf eine Flüssigkeitsröhre wirkende Reibungskraft ergeben. Dabei definierte Hagenbach k als "die Kraft, welche nöthig ist, um eine Flüssigkeitsschicht von der Dicke eines Moleküls und der Einheit der Oberfläche mit der Einheit der Geschwindigkeit an einer anderen Schicht zu verschieben"¹⁷. Aus dieser Definition findet man die Beziehung zwischen k und μ :¹⁸

$$k/n = \mu$$

(2.2.7)

Abgesehen von der Randschicht erfährt jede Flüssigkeitsröhre der Geschwindigkeit $w_0 = w(r_0)$ durch die benachbarte innere mit $w' > w_0$ eine Beschleunigung und durch die äußere mit $w'' < w_0$ eine Abbremsung. Zur Bestimmung dieser beiden Reibungskräfte drückte

Hagenbach die Geschwindigkeitsdifferenzen durch Taylorentwicklungen aus:

$$w' = w(r_0 - 1/n) = w_0 - (1/n) dw/dr + (1/2n^2) d^2w/dr^2 - \quad (2.2.8a)$$

$$w'' = w(r_0 + 1/n) = w_0 + (1/n) dw/dr + (1/2n^2) d^2w/dr^2 + \quad (2.2.8b)$$

Er behandelte also die nur für die diskreten Moleküle definierte Geschwindigkeit wie eine differenzierbare Funktion von r . Die Ausdrücke $w' - w_0$ und $w'' - w_0$ wurden nach der obigen Überlegung jeweils mit der Fläche zwischen den Molekülschichten multipliziert: $2nL(r_0 - 1/2n)$ und $2nL(r_0 + 1/2n)$, wobei L die Länge der Röhre ist. Für die Summe der Reibungskräfte erhielt Hagenbach:

$$2nLk (1/n^2) (r d^2w/dr^2 + dw/dr) \quad (2.2.9)$$

Bei Stokes sorgte die Schräglage der Röhre für die Aufrechterhaltung der Strömung gegen den Widerstand der Reibung. In Hagenbachs Anordnung bewirkte das eine Flüssigkeitssäule mit der konstanten Höhe h über der waagerecht angebrachten zylindrischen Röhre. Die daraus resultierende Kraft auf jede der Flüssigkeitsröhren beträgt:

$$(1/n) 2\pi r g h \quad (2.2.10)$$

Bei einer gleichförmigen Bewegung müssen sich (2.2.9) und (2.2.10) das Gleichgewicht halten:

$$d^2w/dr^2 + (1/r) dw/dr + h g \eta n / (Lk) = 0 \quad (2.2.11)$$

Das ist identisch mit der Gleichung von Stokes (2.2.4), wenn h/L durch $\sin \alpha$ ersetzt und (2.2.7) benützt wird. Hagenbach kannte die Arbeit von Stokes offenbar nicht. Unter seinen zahlreichen Zitaten befanden sich hauptsächlich französische Publikationen. Für die Geschwindigkeit Null am Gefäßrand gab er eine ähnliche Begründung wie Stokes. Aus $w(R)=0$ folgt [vgl. (2.2.5)]:

$$w(r) = (1/4Lk) g \eta n (R^2 - r^2) \quad (2.2.12)$$

Die Integration über den Röhrenquerschnitt liefert das pro Zeiteinheit ausströmende Volumen V [vgl. (2.2.6)]:

$$v = (1/8Lk) \eta \oint g h n R^4 \quad (2.2.13)$$

In einer fast zur gleichen Zeit erschienenen Arbeit wurde eine Berechnung von Franz Neumann wiedergegeben, die zu derselben Bewegungsgleichung führte wie die vorangegangenen Betrachtungen.¹⁹ Neumann behandelte die Randschicht der Flüssigkeit etwas allgemeiner. Neben der inneren Reibung berücksichtigte er auch die Reibung zwischen Wand und Flüssigkeit. Dazu verwendete er einen Koeffizienten ε und stellte die Gleichgewichtsbedingung am ruhenden Gefäßrand auf:

$$\oint dr dw(r)/dt|_{r=R} = -\varepsilon w(R) - \mu dw(r)/dr|_{r=R} \quad (2.2.14a)$$

Für den stationären Fall erhält man:

$$\varepsilon w(R) + \mu dw(r)/dr|_{r=R} = 0 \quad (2.2.14b)$$

Mit dem daraus bestimmten $w(R)$ ist die allgemeine Form des Geschwindigkeitsprofils:

$$w(r) = (1/4L\mu) p [R^2 \{1 + (2\mu/\varepsilon R)\} - r^2] \quad (2.2.15)$$

Statt des Ausdrucks $\oint gh$ in (2.2.12) steht hier p , die Druckdifferenz zwischen den Röhrenden. Bei der Benetzung der Gefäßwand, also unendlich großer äußerer Reibung, reduziert sich der Ausdruck wieder auf das bekannte Ergebnis (2.2.5) bzw. (2.2.12).

Die Randbedingungen spielten auch in der Behandlung der Flüssigkeitsbewegungen durch Helmholtz eine wichtige Rolle.²⁰ Nach seiner Untersuchung über die Wirbel von 1858²¹ wollte er die Reibung einbeziehen, um den allgemeinen Fall der Hydrodynamik zu studieren. Das Interesse an dem Problem rührte teilweise von der Physiologie her. Er war zu jener Zeit Professor für dieses Fach an der Universität Heidelberg. Die Arbeiten von Stokes wie auch die der französischen Autoren kannte er nicht. So vermerkte er 1858: "Der Einfluss der Reibung auf Flüssigkeiten konnte bisher noch nicht mathematisch definiert werden."²² Es war seit dem Sommer 1859 sein

Ziel, "jede specielle Aufgabe von Flüssigkeitsbewegung auf eine mathematische Aufgabe" zu reduzieren.²³ Während er versuchte, die entsprechenden Gleichungen zu konstruieren, deren Zuverlässigkeit er an Experimenten überprüfen wollte, erfuhr er von der früheren Veröffentlichung von Stokes. In Deutschland konnte er sie jedoch nicht erhalten und wandte sich deshalb an W.Thomson.²⁴ Die Beschäftigung mit optischen und akustischen Fragen sowie die Krankheit und der Tod seiner Frau im Dezember 1859 verzögerten die Fertigstellung der Arbeit bis zum März 1860.²⁵ Helmholtz behandelte hier nicht mehr die Herleitung der Gleichungen, sondern verwies auf Poisson, Navier und Stokes. Das Problem bestand nun darin, Versuchsanordnungen zu erdenken, für die sie überhaupt lösbar waren. Helmholtz sah in den Messungen, die an den Kapillarröhren vorgenommen wurden, noch keine strenge Prüfung der mathematischen Theorie. In einer vollständig mit Flüssigkeit gefüllten Hohlkugel, die in drehende Schwingungen um einen ihrer Durchmesser versetzt wurde, fand er ein rechenbares Testobjekt. Aufgrund der Symmetrie bewegt sich die Flüssigkeit auf konzentrischen Kugelschalen. Helmholtz benutzte die Gleichungen von Stokes in kartesischen Koordinaten. Zur Vereinfachung setzte er voraus, die quadratischen Geschwindigkeitsterme vernachlässigen zu können. Experimentell bedeutete dies, eine relativ große Schwingungsdauer bei kleinen Amplituden. Als äußere Kraft wirkt die Gravitation in z-Richtung. Die Gleichungen (2.2.1a-d) lauten daher:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + dp/dx - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.2.16a)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + dp/dy - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.2.16b)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + g \right) + dp/dz - \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.2.16c)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2.16d)$$

Dies transformierte Helmholtz in eine Differentialgleichung für die Winkelgeschwindigkeit ψ , die nur von den Koordinaten r und t abhängt, wobei $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$:

$$u = -y \psi, \quad v = x \psi, \quad w = 0 \quad (2.2.17a)$$

$$\rho \frac{\partial \psi}{\partial t} - \mu \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + (2/r) \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] = 0 \quad (2.2.17b)$$

Aus deren Lösung ergibt sich auch die Kraft pro Volumeneinheit, mit der die bewegte Flüssigkeit auf die Gefäßwand wirkt:

$$F_x = \mu y \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (2.2.18a)$$

$$F_y = -\mu x \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (2.2.18b)$$

Die äußere Reibung hält dieser Kraft das Gleichgewicht:

$$\mu y \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=R} = (1/\nu) \mu y [\psi_{\text{Gefäß}} - \psi(R)] \quad (2.2.19a)$$

$$\mu x \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=R} = (1/\nu) \mu x [\psi_{\text{Gefäß}} - \psi(R)] \quad (2.2.19b)$$

Die Unkenntnis über die Geschwindigkeit der Randschicht steckte Helmholtz in den Parameter ν , der von der Natur der Flüssigkeit und des Gefäßes abhängig sein wird. Durch die folgende Umformung von (2.2.19) wird seine Bedeutung anschaulicher:

$$\psi_{\text{Gefäß}} = \psi(R) + \nu \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (2.2.20)$$

So gibt ν gerade die Entfernung von der Gefäßwand an, in der die äußerste Flüssigkeitsschicht bei linearer Extrapolation deren Geschwindigkeit erreichen würde. Helmholtz nannte ν den Gleitungskoeffizienten. Ein Vergleich mit Neumanns Formel (2.2.14b) zeigt:

$$\nu = \mu/\epsilon \quad (2.2.21)$$

Die Differentialgleichung für die schwingende Kugel mit dem Auslenkwinkel Ω ist:

$$M d^2\Omega/dt^2 = -f^2\Omega + P_{\text{Flüss}} + P_{\text{Luft}} \quad (2.2.22)$$

M bezeichnet das Trägheitsmoment der Kugel, $f^2\Omega$ das Rückstellmoment, $P_{\text{Flüss}}$ und P_{Luft} das Drehmoment der Flüssigkeits- bzw. Luftreibung. Durch $d\Omega/dt = \psi_{\text{Gefäß}}$ und $P_{\text{Flüss}} = 8/3 \pi \mu R^4 \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=R}$ ist (2.2.22) mit der Gleichung für ψ (2.2.17b) und deshalb auch

mit (2.2.16a-d) gekoppelt. Nach einigen Zwischenschritten erhält man schließlich transzendente Gleichungen, aus denen die zwei Koeffizienten μ und ν berechnet werden können, wenn die Meßwerte für die Schwingungsdauer und das logarithmische Dekrement vorliegen.

Die bis dahin festgestellte Gültigkeit des Gesetzes von Hagen-Poiseuille sprach für ein Haften der Flüssigkeit an der Gefäßwand. Helmholtz glaubte jedoch aufgrund eines Vorversuchs an das Auftreten einer Gleitung. Mit der Durchführung der Experimente betraute er v. Piotrowski, der wenig später in Krakau Professor für Physiologie wurde.²⁷ Piotrowski untersuchte zunächst, ob die Beschaffenheit der Gefäßwände die Reibung beeinflusste. Die Beobachtungen der Schwingungen eines bifilar aufgehängten Fläschchens ergaben nach einer Versilberung der Innenfläche eine Verminderung der Reibung um 4,355%(!)²⁸. Der Anschauung von Helmholtz schien eine Gleitung auf Metalloberflächen durchaus zu entsprechen: "Die Anziehungskraft der Wand auf die berührenden Flüssigkeitsschichten kann diese nicht verhindern längs der Wand hinzuzufliessen, ebenso wenig, als die Anziehungskraft der Erde das Wasser hindert ihrer Oberfläche parallel zu fließen."²⁹ Sein Experimentator Piotrowski war in der Einschätzung der Versuchsergebnisse weitaus vorsichtiger: "... wenn wir die beobachteten Unterschiede nicht jenen unbekannten Einflüssen zuschreiben wollen, welche ... sowohl die Schwingungsdauer als das logarithmische Decrement selbst bei ganz gleichen und unmittelbar folgenden Versuchen nicht ganz constant erscheinen lassen."³⁰ Die Schwingungsexperimente wurden mit einer innen vergoldeten Kugel durchgeführt. Den für Wasser berechneten Gleitungskoeffizienten gab Helmholtz mit $\gamma = 2,3534 \text{ mm}(!)^{31}$ an, bei Äther und Alkohol waren die Zahlen so klein, daß er von einem Haften dieser Flüssigkeiten an der Metalloberfläche ausging. Für

den Reibungskoeffizienten des Wassers erhielt er allerdings nur 80% des Wertes, der aus Poiseuilles Versuchen bestimmt worden war.³² Helmholtz erklärte solche Differenzen durch eine im Fall großer ν ausgeprägte Empfindlichkeit der Ergebnisse gegenüber auch nur geringen Schwankungen der Schwingungsdauer. Er behandelte in diesem Zusammenhang die Strömung zylindrischer Röhren mit Gleitung.³³ Sein Rechenweg unterscheidet sich nur wenig von den bereits erörterten. Mit den Gleichungen (2.2.1a-d) gelangte er zu einer zu (2.2.4) analogen Beziehung und dann zu (2.2.15), wenn (2.2.21) eingesetzt wird. Für das pro Zeiteinheit austretende Flüssigkeitsvolumen V fand er [vgl. (2.2.13)]:

$$V = (\eta p / 8 \mu L) (R^4 + 4 \nu R^3) \quad (2.2.23)$$

Dabei bezeichnet p die Druckdifferenz zwischen den Röhrenenden. Mit dieser Doppelarbeit von Helmholtz und Piotrowski - der experimentelle und der theoretische Teil waren zwei separate Kapitel - wurde die Gleitung als neues experimentelles Faktum eingeführt. In der folgenden Zeit beobachtete jedoch fast niemand sonst eine Gleitung.³⁴ W.Wien meinte deshalb in seinem Lehrbuch von 1900, eine Wiederholung der Piotrowskischen Versuche wäre dringend erwünscht.³⁵ L.Graetz wies in seinem Handbuchartikel von 1907 darauf hin, daß ein Vorhandensein der Gleitung nicht vollständig bewiesen sei. Er zitierte sogar im Gegenteil die Ansicht, Temperatureinflüsse und eine "Inkonstanz der bifilaren Aufhängung" könnten das Ergebnis von Helmholtz und Piotrowski verursacht haben.³⁶ R.Ladenburg unternahm es schließlich 1908, die Versuche zu wiederholen.³⁷ Innerhalb der erreichten Genauigkeit fand er keine Veränderung der Schwingungen nach einer Versilberung der inneren Gefäßwand. Piotrowski war offenbar durch äußere Einflüsse eine Wirkung nur vorgetäuscht worden. Man geht heute davon aus, daß eine unmittelbar an einer festen Wand anliegende Schicht einer

realen zähen Flüssigkeit von dieser festgehalten wird, als wäre sie festgeklebt.³⁸ Ladenburg hatte bereits seine Dissertation bei Röntgen in München über Flüssigkeitsreibung angefertigt³⁹ und arbeitete zu jener Zeit am physikalischen Institut in Breslau. Vielleicht mag dort noch eine Tradition fortgewirkt haben, die auf die jahrzehntelange Beschäftigung des ehemaligen Lehrstuhlinhabers O.E.Meyer mit der Reibung in Flüssigkeiten und Gasen zurückging. Meyer war 1904 krankheitsbedingt in den Ruhestand getreten.

2.3 Von der Hydrodynamik zur kinetischen Gastheorie -

Oskar Emil Meyer

Der 1834 als Sohn einer ostfriesischen Arztfamilie geborene Oskar Emil Meyer begann 1854 mit einem naturwissenschaftlichen Studium in Heidelberg.¹ Dort hielt sich bereits sein um vier Jahre älterer Bruder Lothar auf, der später als einer der Entdecker des Periodensystems der Elemente bekannt wurde. Schon im nächsten Semester ging O.E.Meyer nach Zürich, wo er bis 1856 Medizin studierte. Mathematische und physikalische Neigungen veranlaßten ihn dann zu einem erneuten Ortswechsel. Das Ansehen von Franz Neumann in dieser Richtung zog Meyer an dessen Wirkungsstätte nach Königsberg.² Hier traf er wieder mit seinem Bruder zusammen. Eine 1857 von der philosophischen Fakultät ausgeschriebene Preisaufgabe gab den Anstoß für die erste eigenständige Arbeit. Sie bestand darin, die früheren Versuche von Coulomb, bei denen eine Scheibe in einer Flüssigkeit oszillierte "zu wiederholen, fortzuführen und durch theoretische Betrachtungen zu erklären"³. Kernstück der dazu angefertigten Apparatur waren zwei fest miteinander verbundene parallele Kreisscheiben. Diejenige außerhalb der Flüssigkeit besaß eine Teilung und diente zu der brechungsfreien Ablesung der Amplituden. Meyer bekam am 18.1.1858 als Anerkennung für seine Bearbeitung sogar das doppelte Preisgeld.⁴ Es dauerte dann noch zwei Jahre bis er mit einer Untersuchung über die Reibung zwischen zwei Flüssigkeiten den Doktorgrad erwarb.⁵

Obwohl Neumann ihm eine Möglichkeit zur Habilitation bot, verließ er Königsberg.⁶ In dieser entlegenen Stadt hatte er sich nie heimisch gefühlt. Außerdem erschien ihm eine Lehrtätigkeit neben Neumann wenig attraktiv. Meyer war nun ebenso wie sein Lehrer Vertreter einer betont mathematischen Orientierung der Physik und

hoffte, an einer anderen Universität ohne Konkurrenz unterrichten zu können. Gegenüber Neumann argumentierte er, damit dessen in Deutschland noch allein stehender Richtung weitere Anerkennung zu verschaffen. Meyer formulierte dies etwas pathetisch, er wolle zum "Apostel von Neumanns Evangelium" werden.⁷ Hier deutet sich an, daß der Kreis um Neumann damals von seiner Pionierrolle überzeugt war und wesentliche Fortschritte in der Physik von einer tieferen mathematischen Durchdringung erwartete.

Meyer ging auf Anraten und mit Empfehlung Neumanns am Ende des Jahres 1860 zur Universität Breslau, wo bereits sein Bruder Lothar lehrte. Aber schon Anfang 1861 betrachtete Meyer seine Situation dort als aussichtslos.⁸ Es war außer der Dominanz der praktischen Physik die mangelhafte Vorbildung der Studenten, die ihm die Hoffnung nahm, als Privatdozent für die theoretische Physik Boden gewinnen zu können. So berichtete er, daß sein Bruder zur Erklärung der Funktionsweise einer Waage nicht einmal die Hebelgesetze habe voraussetzen dürfen. Der Mathematiker Joachimsthal hätte Meyers Verbleiben begrüßt, weil er von ihm eine elementare Einführungsvorlesung erwartete, auf der er dann aufbauen wollte. Der Ordinarius für Physik Frankenheim ermunterte Meyer zwar, über Theorie vorzutragen, verstand darunter aber eine Veranstaltung mit nur sehr geringen mathematischen Ansprüchen.

Meyer faßte unter diesen Umständen den Entschluß, Breslau zu verlassen und nach Berlin zu gehen.⁹ Dort sollte es nach seinen Informationen relativ leicht sein, auch als Privatdozent eine genügende Anzahl von Studenten zu bekommen. Allerdings wurde gerade an der Berliner Universität der empirische Gesichtspunkt in der Physik besonders betont (vgl. Abschnitt 3.1). Wie schwierig es mitunter sein konnte, mathematische Inhalte zu vermitteln, hatte Meyer schon anläßlich eines Vortrags erlebt, der auf Einladung der

"Berliner Physikalischen Gesellschaft" zustandegekommen war. Die Zuhörer konnten dem Teil seiner Ausführungen, der sich mit partiellen Differentialgleichungen beschäftigte, gar nicht folgen.¹⁰ Sein Thema hing wahrscheinlich mit der Königsberger Preisaufgabe zusammen. Die Publikation dieser Untersuchung verzögerte sich. Das lag an Problemen, die Meyer erst in Breslau zu überschauen begann.¹¹ So erwies sich die Gaußsche Methode zur Bestimmung des relativ kleinen Trägheitsmoments der Apparatur als unzuverlässig, weil die von den Schwingungen mitbewegte Luft das Ergebnis stark beeinflusste. Dies führte Meyer zu der Vermutung, daß die Luftreibung weitaus größer sein mußte, als nach dem Dichteunterschied zwischen Flüssigkeiten und Gasen zu erwarten gewesen wäre.¹² Das neugewonnene Verständnis für die damit verbundenen Fragen machte weitere Berechnungen erforderlich. Im Sommer 1861 erschienen die Ergebnisse dann in zwei Zeitschriften. Die ausführliche mathematische Behandlung druckte das "Journal für reine und angewandte Mathematik"¹³, während der Aufsatz in den "Annalen"¹⁴ bereits von den Lösungen der Differentialgleichungen ausging und neben einer sehr anschaulichen Darstellung des Reibungsbegriffs die experimentellen Einzelheiten besonders eingehend behandelte. Vermutlich wählte Meyer diese Aufteilung aufgrund seiner oben erwähnten Erfahrungen mit den weniger mathematisch orientierten Physikern außerhalb Königsbergs. In den "Annalen" analysierte er die Versuche "ohne Benutzung des mächtigen Hilfsmittels, das die Anwendung der Mathematik gewährt"¹⁵. So begann er eine Art der Darstellung zu entwickeln, mit der er später insbesondere jene Naturforscher ansprechen wollte, "denen die Mathematik fern liegt"¹⁶. Die Herausbildung des eigenen Arbeitsstils, bei dem das Experiment und die mathematische Erklärung nebeneinander standen, war nicht nur eine Folge äußerer

Widerstände gegen "unpraktische Physik"¹⁷, sondern resultierte auch aus der eigenen Unzufriedenheit mit Neumanns als einseitig empfundener Lehre. Dabei beeinflusste ihn sicherlich sein Bruder Lothar, der von 1856 bis 1858 ebenfalls in Königsberg gewesen war und in Neumanns Vorlesungen die Anwendung der Theorie auf die beobachtbare Wirklichkeit vermißt hatte.¹⁸ Nach Lothars Meinung sollte auch für einen mathematischen Physiker die Verbindung zum Experiment unabdingbar sein.¹⁹

Meyers Abhandlung beschäftigte sich ausführlich mit der Erläuterung der hydrodynamischen Bewegungsgleichungen. Dabei machte er die ihnen zugrundeliegende Annahme Newtons plausibel, daß die Reibung zwischen zwei Flüssigkeitsschichten dem Unterschied ihrer Geschwindigkeiten proportional sei, was im Grenzfall kleiner Abstände auf die Ortsableitung der Geschwindigkeit senkrecht zu der Schichtgrenze führte. Die Rechtfertigung für dieses Vorgehen und für die daraus entwickelte Theorie sah Meyer ausschließlich in den experimentellen Ergebnissen: "Dieses Fundamentalgesetz der Reibung kann nur durch die Beobachtung gefunden werden, und zwar so, daß man eine Hypothese über die Form jenes unbekannten Gesetzes der Theorie zu Grunde legt, aus dieser Hypothese den Erfolg eines Experiments voraus berechnet und das Resultat dieser Rechnung mit dem wirklich angestellten Versuch vergleicht."²⁰ Als Konsequenz einer solchen Einstellung müßte die Hypothese dann bei Widersprüchen zum Experiment verworfen werden (vgl. die Haltung von Stokes S.46). Die Theorie besaß demnach noch keine Eigenständigkeit.

Die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen lassen sich für Meyers Experiment erst durch Vereinfachungen der tatsächlichen Situation lösen. Dazu beschränkte Meyer die Flüssigkeitsbewegungen auf den geraden Kreiszylinder, der durch senkrechte Verlängerung der

horizontal aufgehängten, in der Flüssigkeit oszillierenden Kreisscheibe entsteht. Die Reibung mit der außerhalb dieses Bereichs befindlichen Flüssigkeit wurde demgemäß vernachlässigt. Tatsächlich beobachtet man statt dieser diskontinuierlichen Geschwindigkeitsänderung eine Übergangszone, in der die Bewegung abklingt. Mit zunehmendem Scheibenradius vermindert sich ihr Einfluß. Ihn hier nicht einzubeziehen, ergibt etwas zu große Werte für die Reibung. Weiterhin ging Meyers Ansatz von einer unendlich dünnen Scheibe aus. Die endliche Dicke wurde erst in den Schlußformeln durch ein Korrekturglied berücksichtigt. Die Flüssigkeit oszilliert in jeder horizontalen Schicht ohne Veränderung der relativen Positionen. Diese Schichten bewegen sich demnach so, als wären sie feste Scheiben. Reibung gibt es folglich nur zwischen Flüssigkeitsteilchen verschiedener Schichten. Deshalb läßt sich die Bewegung der Flüssigkeit allein durch die Angabe einer Winkelgeschwindigkeit ψ als Funktion des Abstands von der eingetauchten Scheibe x und der Zeit t vollständig beschreiben. Die Lösung der entsprechenden Differentialgleichung für die Flüssigkeit (2.2.1a-d in Zylinderkoordinaten transformiert und die quadratischen Geschwindigkeitsglieder vernachlässigt) setzte Meyer, analog zu der Vorgehensweise von Helmholtz bei der oszillierenden Hohlkugel (vgl. 2.2.22), in die Schwingungsgleichung für die Scheibe ein:

$$M \frac{d^2 \Omega}{dt^2} = -f^2 \Omega + n \mu R^4 \left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (2.3.1)$$

Aufgrund von Versuchen mit Scheiben verschiedener Materialien, die unter ansonst identischen Bedingungen zu gleichen Resultaten führten, schloß Meyer eine Gleitung hierbei aus. Schließlich erhielt er Beziehungen, aus denen er mit den Werten für die Schwingungsdauer und das logarithmische Dekrement die Größe $\sqrt{\mu \rho}$, also den Reibungskoeffizienten bestimmen konnte. Dabei ist ρ die Dichte. Befriedigend fand er den Vergleich mit dem Ergebnis, das Hagenbach

nach der Strömungsmethode für Wasser erhalten hatte. Es war zwar 15% kleiner, aber Meyer erklärte das zumindest teilweise durch die Entstehung von Turbulenzen in Hagenbachs Versuchen sowie durch die Art seiner eigenen Näherung. Das um 35% größere Resultat von Helmholtz erschien Meyer wegen der gleichzeitigen Bestimmung von innerer Reibung und Gleitung zwangsläufig ungenauer.²¹

Die anfangs nur als Störfaktor betrachtete Luftreibung wurde zu einem weiteren Gegenstand von Meyers Untersuchung. Es stellte sich heraus, daß sie auf die gleiche Weise wie die Flüssigkeitsreibung gemessen werden konnte. Dabei erhielt Meyer für die relativ zum Wasser 770fach dünnere Luft einen nur 37mal kleineren Reibungskoeffizienten.²² Die laut Meyer für den molekularen Aufbau der Körper sonst allgemein verwendete Vibrationstheorie, bei der die Moleküle eine feste Ruhelage besitzen, würde mit diesem Ergebnis nur dann vereinbar sein, wenn die Molekularkräfte der Luft weitaus stärker wären als die des Wassers. Meyer klassifizierte das als "mindestens unwahrscheinlich".²³ Eine zwanglose Erklärungsmöglichkeit sah er dagegen in der "Bernoulli-Clausius'schen Ansicht über die Constitution der Gase".²⁴ Auf dieser Grundlage beschrieb er die Reibung zwischen zwei Schichten unterschiedlicher Geschwindigkeit qualitativ durch den wechselseitigen Austausch von Molekülen, der eine Impulsübertragung bewirkt. Maxwells Veröffentlichung mit den dazugehörigen Berechnungen lag bereits seit einem Jahr vor, aber Meyer zitierte nicht ihn, sondern die beiden Aufsätze von Clausius.

Auch J.Stefan griff diese Ideen auf. In seiner Arbeit "Ueber die Bewegung flüssiger Körper" von 1862 artikulierte er das Bedürfnis nach einem Verständnis der Reibung, das über die bloße mathematische Beschreibung hinausging.²⁵ Die Bedeutung dieser Suche nach dem "Wesen" der Erscheinung, wie er es nannte, sollte auch darin

liegen, "Aufschlüsse über die innere Constitution der Flüssigkeiten" zu erhalten.²⁶ Die Hypothese von Clausius erfüllte dies für die Gase, denn sie "gibt auch von dem Wesen der inneren Reibung eine bestimmte, der Berechnung zugängliche Vorstellung."²⁷ Der für Stefan jetzt naheliegende Schritt war eine Übertragung dieses für ihn offenbar attraktiven Konzepts auf die Flüssigkeiten. Allerdings mußte die Reibung nach der Theorie bei größeren Molekülgeschwindigkeiten, also höheren Temperaturen, zunehmen. Das stand im Widerspruch zu dem bekannten Verhalten der Flüssigkeiten und wäre für die Gase, wie Stefan konstatierte, ein noch ausstehender Test. Es blieb offen, ob seine neu eingeführte Hypothese einer zusätzlichen Drehung der Moleküle im Fall der Reibung diese Schwierigkeit bei den Flüssigkeiten würde beheben können.

Meyers wissenschaftliche Zukunft in Berlin war ungewiß. Er hatte den Druck seiner Arbeit abwarten müssen, ehe er überhaupt ernsthafte Gespräche hinsichtlich seiner Habilitationsabsicht beginnen konnte.²⁸ Nebenher besuchte er eine Vorlesung von Weierstraß über die Anwendung elliptischer Funktionen auf mechanische und geometrische Probleme.²⁹ Die eigene Forschung kam nicht voran, denn die ihn interessierenden Fragestellungen erwiesen sich als unergiebig. Zwei davon hatten sich unmittelbar aus den vorangegangenen Experimenten ergeben. So wollte er die Abhängigkeit der Drahtreibung vom Durchmesser und der Magnetisierung bestimmen.³⁰ In Berlin erfuhr er allerdings durch Quincke, daß G.Wiedemann bereits mit derselben Untersuchung beschäftigt war. Daraufhin ließ Meyer von diesem Vorhaben wieder ab. Seine Idee, die Luftreibung aus den Schwingungen eines mit Gasen verschiedener Dichten gefüllten Zylinders zu bestimmen, scheiterte an mathematischen Schwierigkeiten.³¹ Bei der Suche nach ganz anderen Themen stieß er auf die ausstehende Beobachtung von Zirkularpolarisation an zweiachsigen Kristallen,

jedoch kam ihm Quincke hier zuvor. Danach wandte er sich der Theorie der Wasserströmung in zylindrischen Röhren zu, ohne indes brauchbare Resultate zu erzielen.³² Da er auch mit seinen Habilitationsplänen nicht vorankam, erwog er ernsthaft eine Rückkehr nach Königsberg³³, wovon sein Bruder ihn aber wieder abzubringen wußte.³⁴

Einen Aufenthalt von Wilhelm Weber in Berlin nutzte Meyer zu einer Begegnung, bei der er sich als "mathematischer Helfershelfer" anbot.³⁵ Dies führte im Dezember 1861 zur Übersiedlung nach Göttingen. Dort erhoffte er sich mehr Entgegenkommen als in Berlin, "wo sich keiner um den anderen kümmert"³⁶, wie er enttäuscht meinte. Seine Erwartungen wurden erfüllt, denn noch im gleichen Monat ließ man ihn seine Probevorlesung "Über die Gaussische Methode zur Bestimmung der Trägheitsmomente" halten.³⁷ Die philosophische Fakultät erwirkte daraufhin am 22.2.1862 die Erteilung der *venia legendi* für zwei Jahre.³⁸ Es bestanden günstige Voraussetzungen für Meyers Lehrtätigkeit. Weber, Dirichlet und Riemann hatten unter den Studenten Interesse für die mathematische Physik wecken können. Nach Meyers Ansicht stellten sie dabei aber keine Verbindung zu den experimentellen Tatsachen her.³⁹ Das war gerade sein Anliegen und so glaubte er, eine Lücke des Angebots schließen zu können. Im Sommer 1862 begann er vor drei Hörern. Im folgenden Wintersemester saßen in seiner Vorlesung über Elastizität acht Studenten. Angesichts von höchstens zwölf bei Riemann sah er darin das für ihn erreichbare Maximum.⁴⁰ Riemanns krankheitsbedingte Abwesenheit veranlaßte ihn zu einer Erweiterung der angebotenen Themen, da er eine Abwanderung der mathematisch orientierten Studenten befürchtete. So kündigte er für den Sommer 1863 neben der Optik noch Meteorologie an, ein Gebiet, das er selbst erst lernen mußte.⁴¹

In der Forschung war er seit dem Frühjahr 1862 auf die Luftreibung und damit allgemeiner auf die Gastheorie zurückgekommen. Dabei hatte er anfangs offenbar Schwierigkeiten, die Arbeiten von Clausius und Maxwell zu verstehen. Das aus eigenen Rechnungen hergeleitete Resultat einer von der Dichte unabhängigen Reibung erschien ihm unsinnig. Für diesen "Blödsinn" machte er die Vernachlässigung der inneren Freiheitsgrade der Moleküle verantwortlich.⁴² Erst im Laufe des Jahres 1863 erkannte er, daß Maxwell, dem er zuvor noch die Ansicht von einer der Dichte proportionalen Reibung zugeschrieben hatte⁴³, bereits zu der gleichen Schlußfolgerung gelangt war.⁴⁴ So verging einige Zeit, bis er sich in die Theorie eingearbeitet hatte. Die Lösung der experimentellen Fragen gelang schneller. Seine Zweifel an der Zuverlässigkeit der bei der Flüssigkeitsreibung verwendeten Versuchsanordnung für die Bestimmung der Luftreibung wurden durch die Lektüre einer Abhandlung von Stokes aus dem Jahr 1850 verstärkt.⁴⁵ Dessen Werte, die aus Pendelversuchen berechnet worden waren, wichen deutlich von Meyers Zahlen ab. Eine wichtige Fehlerquelle glaubte Meyer jetzt ausmachen zu können.⁴⁶ Zur Trennung der beiden sich überlagernden Effekte der Draht- und Luftreibung hatte er die Messungen jeweils mit zwei verschiedenen großen Scheiben durchgeführt. Unter der Voraussetzung eines konstanten Einflusses der Drahtreibung sollte die Differenz der logarithmischen Dekremente nur noch von der Luftreibung abhängen. Meyer mußte jedoch feststellen, daß die unterschiedliche Belastung der Aufhängung auch die Drahtreibung veränderte. Er ließ deshalb 1862 eine neue Apparatur anfertigen.⁴⁷ Sie bestand im wesentlichen aus drei gleichen parallelen Scheiben. Die Drehachse ging senkrecht durch deren Mittelpunkte. Wegen der geringeren Störanfälligkeit wählte Meyer diesmal eine bifilare Aufhängung. Das ganze befand sich in einer

luftdicht abgeschlossenen gläsernen Glocke, in welcher der Druck mit Hilfe einer Pumpe variiert werden konnte. In den Versuchen waren dann sechs Scheibenoberflächen der Luftreibung ausgesetzt. Deren Anzahl ließ sich durch das Zusammendrücken der drei Scheiben zu einer einzigen auf zwei reduzieren. Die Belastung der Aufhängung blieb bei dieser Veränderung gleich, womit laut Meyer die Differenz der Meßwerte von Störungen erster Ordnung befreit war. Alternativ verwendete er die früher von Baily benützte Methode, die Schwingungen unter atmosphärischem Druck mit denen in sehr stark verdünnter Luft, bei der die Reibung vernachlässigbar klein sein sollte, zu vergleichen. Stokes' Berechnungen beruhten auf solchen Messungen. Die Ergebnisse der zwei Verfahren unterschieden sich deutlich.⁴⁸ Meyer fand die Erklärung in der nahezu von der Dichte unabhängigen Reibung. Obwohl er diese Aussage nicht uneingeschränkt auf beliebig kleine Drücke ausdehnen wollte, erwies sich die Messung in stark verdünnter Luft doch als ungeeignet für die Reduktion der Störungen. Diese Betrachtungen stellte Meyer der wissenschaftlichen Öffentlichkeit in einem Vortrag anlässlich der Naturforscherversammlung in Stettin am 23.9.1863 vor.⁴⁹ Er beließ es nicht bei der reinen Erörterung der Fakten, sondern engagierte sich beinahe enthusiastisch für die in Deutschland mit dem Namen von Clausius verbundene Hypothese bzw. für die dynamische Gas-theorie, wie sie in England damals bezeichnet wurde. So wollte er seine Beobachtungen als neue Bestätigung für die Richtigkeit jener Ideen gewertet wissen, "für welche sich täglich die Beweise mehren"⁵⁰. Nachdem er in seinen Experimenten bislang Messing-scheiben verwendet hatte, führte er im Dezember 1863 Meßreihen mit Glasscheiben durch. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede. Im Druckintervall von 250 mm Hg bis zu einer Atmosphäre änderte sich die Reibung nur wenig und Meyer kleidete die

Ergebnisse recht vorsichtig in die Worte, "daß der Reibungskoeffizient der Luft mit abnehmender Dichtigkeit sich weit langsamer ändert, als diese."⁵¹ Im Januar 1864 untersuchte er die Temperaturabhängigkeit. Maxwells Theorie verlangt nach (2.1.10):

$$\mu \sim \sqrt{T} \quad (2.3.2)$$

Gemessen wurde aber die Größe:

$$\sqrt{\mu \eta} \sim 1/\sqrt[4]{T} \quad (2.3.3)$$

Deren Temperaturempfindlichkeit ist also merklich geringer. Meyers Beobachtungen im kleinen Intervall von 8,3°C bis 34,4°C ließen demgemäß nur Änderungen von ungefähr 2% erwarten. Das war kaum mehr als die Genauigkeit der Meßwerte. Funktionale Zusammenhänge kann man damit nicht nachweisen. Erkennbar war lediglich der Unterschied zum Verhalten der Flüssigkeiten, bei denen die Reibung schon merkbar abnehmen mußte. Meyer reichte es dennoch aus, um die Richtigkeit von (2.3.2) für wahrscheinlich zu halten.⁵² Das plausible Konzept der Gastheorie schien für ihn bereits mehr zu sein als eine bloße Beschreibung vieler Tatsachen in wenigen Formeln. Er suchte deshalb eher nach Bestätigungen als nach Widersprüchen. So bekam die Theorie in der Sicht von Meyer ein gewisses Eigengewicht.

Die Publikation dieser Untersuchungen verzögerte sich durch einen mit seiner akademischen Laufbahn zusammenhängenden Ortswechsel. Bereits 1862 hätte er beinahe einen Ruf nach Graz auf eine Professur für Mathematik mit physikalischer Ausrichtung erhalten.⁵³ Zunächst bat man ihn nur um Rat, woraufhin er Neumanns Sohn Carl sowie Christoffel nannte. Nachdem die Fakultät diese nicht bekommen konnte, setzte sie Meyer selbst an die erste Stelle ihrer Vorschlagsliste. Das Ministerium zog aber den zweitplacierten österreichischen Kandidaten vor, bei dem es sich um den Astronomen Carl Hornstein handelte.⁵⁴ Die unbefristete Verlängerung der

venia legendi in Göttingen erfolgte problemlos. Am 14.12.1863 gab die philosophische Fakultät eine entsprechende Empfehlung, da Meyer "als Docent nicht ohne Erfolg thätig gewesen ist und sich wissenschaftlich günstig bewährt hat."⁵⁵ Wilhelm Weber äußerte sich positiv über "die wissenschaftliche Begabung und die soliden mathematischen und physikalischen Studien" von Meyer.⁵⁶ Er empfahl ihn 1867 neben anderen für die Besetzung der Professur an der Polytechnischen Schule in Zürich: "Durch seine Leistungen im Fach der mathematischen Physik wird er zum Nachfolger von Clausius vorzüglich geeignet sein."⁵⁷ Zu dieser Zeit bekleidete Meyer bereits seit über zwei Jahren eine Professur in Breslau. Nachdem Lipschitz die dortige Universität verlassen hatte, versuchte man vergeblich, Carl Neumann für die Stelle zu gewinnen.⁵⁸ Der Einfluß von Franz Neumann brachte Meyer in die engere Wahl.⁵⁹ Am 9.5.1864 verabschiedete die Breslauer Fakultät einen Vorschlag mit Christoffel an der ersten und Meyer an der zweiten Position.⁶⁰ Aufgrund der finanziellen Situation war an eine Berufung Christoffels wohl nicht ernsthaft gedacht worden⁶¹ und schon im Juni erhielt Meyer die förmliche Ernennung zum Extraordinarius.⁶² Damit wurde er Professor für Mathematik, was er durchaus als eigentümlich empfand.⁶³ Seine wirkliche Aufgabe sah er in der mathematischen Physik und betrachtete sich deshalb eher als Nachfolger Kirchhoffs, der Breslau zehn Jahre zuvor mit Heidelberg vertauscht hatte.⁶⁴ Aus Breslau bestärkte man ihn darin, etwa wenn ein künftiger Kollege ihm vorschlug, er solle "den Studierenden der Mathematik die Möglichkeit verschaffen, sich unter kundiger Anleitung mit der theoretischen Erklärung der Naturerscheinungen bekanntzumachen."⁶⁵ Offiziell gab es keine Vorschrift, von welcher Art seine Vorlesungen zu sein hätten. Meyer kam es sehr entgegen, "daß der Minister diesen etwas delikaten Punkt ganz unberührt

gelassen hat."⁶⁶ In seiner akademischen Karriere ging es nun rasch voran. Noch am Ende des Jahres 1864 zeigte die Universität Tübingen Interesse für ihn.⁶⁷ Die Ablehnung des Rufs an die Polytechnische Schule in Braunschweig als Nachfolger G.Wiedemanns ließ er sich 1865 mit einem Ordinariat honorieren.⁶⁸ Nach der Pensionierung des Direktors des physikalischen Kabinetts Frankenheim rückte er 1867 in dessen Position auf. Zwar bedauerte er, durch die Verpflichtung zu Vorlesungen über Experimentalphysik weniger Zeit für die mathematische Physik zu haben, andererseits freute er sich über die ihm zur Verfügung stehenden Apparaturen.⁶⁹ Bis zu seinem krankheitsbedingten Ruhestand im Jahr 1904⁷⁰ behielt er diese Stelle. Einen Ruf nach Königsberg lehnte er 1877 ab.⁷¹

Im April 1865 konnte Meyer die in Göttingen begonnene Arbeit an der Publikation über die Luftreibung abschließen. Gleich im Titel gab er mit der Bezeichnung "Erste Abhandlung" zu erkennen, daß dies Teil eines größeren Forschungsprogramms war. Weitaus vorsichtiger als in Stettin äußerte er sich in der Einleitung zum Stellenwert der Hypothese der molekularen Stöße. So betonte er, daß sich ihre Bedeutung auf die mechanische Wärmetheorie beschränke. Sie stelle infolgedessen keine Alternative zu der bis dahin vorherrschenden Hypothese der molekularen Kräfte dar, auf der "fast das ganze Gebäude der mathematischen Physik beruht."⁷² Mit diesem begrenzten Anspruch wollte er vermutlich auch mögliche Kritik gering halten. Die Untersuchung der Reibung bot sich als Testfall für die Idee der Stöße an, weil sie "im Sinne der Hypothese einer der einfachsten Vorgänge ist, bei denen die molekularen Bewegungen und Stöße zur Geltung kommen."⁷³ Die Experimente fielen nach Meyers Ansicht positiv für die Hypothese aus. Dies verstand er allerdings noch nicht als definitive Aussage über die molekulare Realität: "Ich bin indeß weit entfernt, in

dieser Bestätigung der Theorie einen Beweis für die Wahrheit der Hypothese zu sehen; vielmehr halte ich weitere Prüfungen durch Beobachtungen anderer Art, namentlich durch thermische Betrachtungen für durchaus notwendig."⁷⁴ In einem abschließenden Kapitel gab Meyer eine Herleitung für den Reibungskoeffizienten an, die übersichtlicher war als die von Maxwell. Während dieser die Wechselwirkung aller Schichten oberhalb einer Ebene mit allen anderen unterhalb jener Ebene berechnete, bestimmte Meyer die aus dem oberen und unteren Halbraum pro Zeiteinheit auf ein Flächenstück treffenden Impulsbeiträge. Deren Differenz entspricht der Reibung. Diese Vorgehensweise wurde in modifizierter Form auch von den späteren Lehrbüchern übernommen. Meyers irrtümliche Annahme, daß nicht der Stoß, sondern allein der Ortswechsel der Teilchen in einen Bereich mit einer anderen Strömungsgeschwindigkeit für den Impulsübertrag verantwortlich wäre⁷⁵, wirkte sich hier nicht aus. In der Formel von Clausius (1.3.2) waren die Stöße implizit enthalten. Die Zahl der Teilchen, die pro Zeiteinheit von einem Volumelement $dx'dy'dz'$ am Punkt (x',y',z') den Weg bis zu einem Flächenelement $dxdy$ am Koordinatenursprung in der Entfernung r durchlaufen, ist [vgl. (2.1.2)]:

$$1/(4\pi r^2) N (v/l) e^{(-r/l)} \cos \vartheta dxdy dx'dy'dz' \quad (2.3.4)$$

Dabei ist $\cos \vartheta = z'/r$. Mit der zur x -Achse parallelen Strömungsgeschwindigkeit $u(x',y',z')$ sowie der Bezeichnung $u_0 = u(0,0,0)$ und der Teilchenmasse m sind die gesuchten Impulsbeiträge pro Zeiteinheit:

$$I_1 = dxdy mNv/(4\pi r^2 l) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} u(x',y',z') e^{(-r/l)} \cos \vartheta dx'dy'dz' \quad (2.3.5a)$$

$$I_2 = dxdy mNv/(4\pi r^2 l) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^0 u(x',y',z') e^{(-r/l)} \cos \vartheta dx'dy'dz' \quad (2.3.5b)$$

Dann wird $u(x', y', z')$ in eine Taylorreihe um den Nullpunkt entwickelt (die Ableitungen verstehen sich an der Stelle Null):

$$u(x', y', z') = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} x' + \frac{\partial u}{\partial y} y' + \frac{\partial u}{\partial z} z' + \dots \quad (2.3.6)$$

Der Übergang zu Kugelkoordinaten

$$x' = r \sin \vartheta \cos \varphi \quad y' = r \sin \vartheta \sin \varphi \quad z' = r \cos \vartheta \quad (2.3.7)$$

bringt (2.3.5a-b) in die Form:

$$I_1 = dx dy mNv / (4\pi l) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} u_1(r, \vartheta, \varphi) e^{(-r/l)} \cos \vartheta \sin \vartheta dr d\vartheta d\varphi \quad (2.3.8a)$$

$$I_2 = dx dy mNv / (4\pi l) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} u_2(r, \vartheta, \varphi) e^{(-r/l)} \cos \vartheta \sin \vartheta dr d\vartheta d\varphi \quad (2.3.8b)$$

Mit:

$$u_1 = u_0 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \sin \vartheta \sin \varphi + \frac{\partial u}{\partial y} \sin \vartheta \cos \varphi + \frac{\partial u}{\partial z} \cos \vartheta \right) r + \dots \quad (2.3.9a)$$

$$u_2 = u_0 - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \sin \vartheta \sin \varphi + \frac{\partial u}{\partial y} \sin \vartheta \cos \varphi + \frac{\partial u}{\partial z} \cos \vartheta \right) r + \dots \quad (2.3.9b)$$

Dies eingesetzt und integriert:

$$I_1 = dx dy mNv / (2l) \left[u_1/2 + \frac{\partial u}{\partial z} (l^2/3) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} (l^3/4) + \dots \right] \quad (2.3.10a)$$

$$I_2 = dx dy mNv / (2l) \left[u_1/2 - \frac{\partial u}{\partial z} (l^2/3) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} (l^3/4) - \dots \right] \quad (2.3.10b)$$

Schließlich erhielt Meyer die gesuchte Reibung R:

$$R = (I_1 - I_2) / dx dy = (mNv/l) \left[\frac{\partial u}{\partial z} (l^2/3) + \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} (l^4/5) + \dots \right] \quad (2.3.11)$$

Bei kleinem l und Abbruch der Reihe nach dem ersten Glied:

$$R = (1/3) (mNvl) \frac{\partial u}{\partial z} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.3.12)$$

Der Reibungskoeffizient ist also wie in (2.1.10a):

$$\mu = (1/3) mNvl = (1/3) \rho l v \quad (2.3.13)$$

Dies galt nur für ein nicht zu stark verdünntes Gas, bei dem die mittlere freie Weglänge noch mikroskopisch klein ist. Die andere Situation glaubte Meyer ohnehin außerhalb des Anwendungsbereichs

der Theorie ansiedeln zu müssen, weil er dann einen merklichen Einfluß der Gefäßwandung vermutete.⁷⁶ In seiner Bewertung am Ende der Abhandlung räumte er, anders als in der Einleitung, eine nur angenäherte Bestätigung der Vorhersagen durch die Experimente ein. Eine mögliche Erklärung erblickte er in den Abweichungen vom idealen Gaszustand, womit er doch wieder molekulare Kräfte in Betracht zog.

Noch im Juli des gleichen Jahres stellte er die zweite Veröffentlichung über die Gasreibung fertig.⁷⁷ Sie behandelte frühere Experimente von Graham unter dem Gesichtspunkt der neuen Theorie. Von ähnlichen Bemühungen Stokes' war bereits die Rede (s.S.43). Graham hatte Gasströmungen in Kapillarröhren untersucht, ganz analog zu den Versuchen mit Flüssigkeiten.⁷⁸ Gemessen wurde die Zeit, die ein bestimmtes Gasvolumen für das Durchlaufen der Röhre benötigte. Die Drücke an deren Ende und die Temperatur waren die Parameter. Meyer zeigte, daß auch hierfür ein dem Gesetz von Hagen-Poiseuille entsprechender Zusammenhang gilt. Dabei ging die Konstanz des Reibungskoeffizienten μ in dem Druckgefälle innerhalb der Röhre als Voraussetzung ein. Unter den Bedingungen einer stationären, parallel zur Achse verlaufenden Bewegung und der Vernachlässigung einiger Glieder höherer Ordnung ergab sich in der allgemeinen Form einschließlich der Gleitung γ für das in der Zeit t durchgelaufene Volumen:

$$V = nt (p_1^2 - p_2^2) R^4 (1 + 4 \gamma / R) / (16 \mu p L) \quad (2.3.14)$$

wobei p_1 , p_2 die Drücke an den Röhrenenden sind und p der Druck ist, unter dem V gemessen wird. Wählt man $p = (p_1 + p_2) / 2$, so wird (2.3.14) identisch mit der Formel (2.2.23) von Helmholtz. Meyer stützte sich mangels eigener Experimente auf die Werte Grahams, von denen allerdings nur wenige zur Überprüfung von (2.3.14)

geeignet waren. Für den Ausfluß eines definierten Volumens unter konstantem $p = p_1$ in ein gutes Vakuum ($p_2 = 0$) wird (2.3.14):

$$V = nt p_1 R^4 (1 + 4 \gamma/R)/(16\mu L) \quad (2.3.15)$$

Aus Grahams Zahlen fand Meyer das Produkt $p_1 t$ annähernd konstant. Da die übrigen Größen ebenfalls Konstanten sein sollten, erwiesen sich die Überlegungen als konsistent. Ähnliche Ergebnisse lieferten noch weitere Meßreihen, bei denen andere Größen in Übereinstimmung mit (2.3.14) konstant blieben. Meyer bewertete dies als einen neuen Beweis für die als Prämisse eingegangene Druckunabhängigkeit der Reibung: "Dieses Gesetz hat somit eine doppelte Bestätigung durch zwei ganz verschiedene Classen von Beobachtungen gefunden An seiner Richtigkeit kann folglich nicht gezweifelt werden."⁷⁹ Der Reibungskoeffizient, der sich hieraus für Luft ergab, war im Vergleich zu dem mit dem Torsionspendel bestimmten Wert deutlich kleiner.⁸⁰ Meyer versuchte, dies durch das Auftreten einer Gleitung zu erklären. Statt μ wäre dann der Ausdruck $\mu/(1 + 4 \gamma/R)$ gemessen worden. Durch Einsetzen des aus den Pendelexperimenten erhaltenen μ berechnete er den Gleitungskoeffizienten γ unter der Voraussetzung von dessen Druckunabhängigkeit. Bei den oszillierenden Scheiben hatte er eine Gleitung noch ausgeschlossen, weil Messing- und Glasscheiben die gleichen Ergebnisse erbrachten (s.S.65). Darin sah er keinen Widerspruch, weil er die Wirkung von $\gamma \approx 0,01$ mm bei jenen Versuchen ungleich geringer veranschlagte als bei den Kapillarröhren. Die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit der Transpirationszeit t für enge und weite Röhren deutete Meyer als ein weiteres Indiz für die Existenz der Gleitung. Nach (2.3.14) gilt $t \sim \mu/(1 + 4 \gamma/R)$. Bei weiten Röhren ist die Gleitung vernachlässigbar und aus der von Graham gefundenen Beziehung $t \sim \sqrt{T}$ folgt in Übereinstimmung mit der Gastheorie $\mu \sim \sqrt{T}$. Für enge Röhren, also bei kleinem R , hatte sich

$t \sim T$ ergeben, was Meyer mit einer temperaturabhängigen Gleitung $\eta \sim 1/T$ zu beheben suchte. Er gestand ein, daß diese Argumentationsweise nicht ganz befriedigend sei. Festlegen wollte er sich nur noch auf die Zunahme der Reibung mit der Temperatur, nicht aber auf den funktionalen Zusammenhang. Insgesamt dokumentiert auch diese Publikation von Meyer eine starke Gewichtung zugunsten der Theorie, an welche die experimentellen Resultate teilweise angepaßt wurden.

Bereits im November 1863 hatte Maxwell mit schwingenden Messing-scheiben Experimente zur Bestimmung der Viskosität von Gasen durchgeführt, war jedoch zunächst nicht in der Lage, die Effekte an den Scheibenrändern zu berücksichtigen.⁸¹ Mit Hilfe von W.Thomson formulierte er im Januar 1865 eine Theorie dafür.⁸² Zu jener Zeit konnte er auch über eine neue Apparatur verfügen.⁸³ Der Unterschied zu Meyers Anordnung bestand im wesentlichen darin, daß sich die drei schwingenden jeweils zwischen zwei fixierten Scheiben befanden. Der Vorteil lag in der Veränderung der Formel, die nicht wie bei Meyer $\sqrt{\mu}$, sondern direkt μ lieferte, was die Wirkung der Meßfehler halbierte. Zur Reduktion des Einflusses der Aufhängung ging Maxwell analog wie Meyer vor. Er schob die drei beweglichen Scheiben zusammen und befestigte die fixierten ober- und unterhalb davon. Im Frühjahr 1865 ergab die Versuchsauswertung, daß die Reibung in einem Bereich von 13 mm Hg bis zum atmosphärischen Druck im Rahmen der Meßgenauigkeit konstant blieb.⁸⁴ Für deren Zunahme mit steigender absoluter Temperatur T erhielt Maxwell aber statt der von seiner Theorie vorhergesagten Proportionalität zu $\sqrt{T}$, eine zu T . Dies schloß er hauptsächlich aus Messungen bei den zwei Temperaturen 10,5°C und 85°C.⁸⁵ Maxwell fühlte sich offenbar in seinen früheren Zweifeln bestätigt (s.S.42) und nahm dies zum Anlaß, die gesamte Theorie der

molekularen Stöße zu verwerfen. An deren Stelle setzte er eine abstoßende Molekularkraft, die der fünften Potenz des Abstands umgekehrt proportional sein sollte. Damit gerade wurde die Reibung zu einer linearen Funktion der Temperatur.⁸⁶ Maxwell teilte Graham seine Ergebnisse mit, weil er ebenso wie Stokes und Meyer in dessen Untersuchungen zur Transpiration eine weitere unabhängige Bestätigung für das Verhalten des Reibungskoeffizienten sah.⁸⁷ Die Bestimmung der absoluten Werte zog sich noch etwas hin.⁸⁸ Meyers deutlich größere Zahlen waren nach Maxwells Ansicht die Folge einer unzureichenden Berücksichtigung des Effekts am Rand der Scheiben. Maxwell vermerkte außerdem, eine Gleitung nicht gefunden zu haben.

Meyer erkannte die Verbesserung an, die Maxwell durch die eingefügten, festen Scheiben erreicht hatte, und veränderte 1868 seine Apparatur entsprechend.⁸⁹ Jetzt erhielt er bei Zimmertemperatur annähernd den gleichen Wert des Reibungskoeffizienten für Luft wie Maxwell.⁹⁰ Dies führte auch zu einer Revision seiner Überlegung über die Gleitung, die nun nicht mehr notwendig war. Zweifel äußerte Meyer an der von Maxwell gefundenen Temperaturabhängigkeit. Bevor er dieser Frage genauer nachging, überprüfte er 1872 nochmals das Hagen-Poiseuillesche Gesetz für Gase.⁹¹ Sieben Jahre zuvor hatte er sich ohne eigene Experimente lediglich auf Grahams Zahlen stützen können. Die Übereinstimmung zwischen den jetzt gewonnenen und den aus den Schwingungsversuchen erhaltenen Reibungskoeffizienten erschien Meyer befriedigend. Dies war ebenso wie die Unabhängigkeit von dem Durchmesser der Röhren für ihn hinreichend, eine Gleitung nunmehr auszuschließen. In der unmittelbar folgenden fünften Abhandlung zur inneren Reibung der Gase ging es um den Einfluß der Temperatur.⁹² Dazu benutzte Meyer

sowohl das Strömungsverfahren als auch die Versuchsanordnung Maxwells. Die Taylorentwicklung von $\mu(T)$ um $T_0 = 273^\circ\text{C}$ liefert:

$$\mu(T) = \mu(T_0) [1 + \mu'(T_0) (T-T_0)/\mu(T_0) + \frac{1}{2} \mu''(T_0) (T-T_0)^2/\mu(T_0) + \dots] \quad (2.3.16a)$$

Er nahm dabei eine Form $\mu(T) \sim T^n$ an. Das führt auf:

$$\mu(T) = \mu(T_0) [1 + n \{(T-T_0)/T_0\} + \frac{1}{2} n(n-1) \{(T-T_0)/T_0\}^2 + \dots] \quad (2.3.16b)$$

Meyer brach die Reihe nach dem Glied erster Ordnung ab:

$$\mu(T) \approx \mu(T_0) [1 + n(T-T_0)/T_0] \quad (2.3.16c)$$

Meyer bestimmte die Steigung dieser Geraden aus den Meßergebnissen für jeweils zwei verschiedene Temperaturen. Eine Ausgleichsgerade berechnete er nicht.⁹³ Bezogen auf die Einheit $\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ und mit der Abkürzung $\Theta := T - T_0$, die hier dimensionsfrei sein soll, hatte Maxwell

$$\mu = 0.0001878 (1 + 0.00365 \Theta) \approx 0.0001878 (1 + 1/273 \Theta) \quad (2.3.17a)$$

gefunden. Sein Resultat entspricht $n=1$ in (2.3.16c). Bei Meyer war die Steigung der Geraden in allen Fällen deutlich geringer. Den größten Wert erhielt er für die Temperaturen von 19°C und 82°C am Torsionspendel⁹⁴:

$$\mu = 0.000186 (1 + 0.0030 \Theta) \quad (2.3.17b)$$

Allerdings war dies auch keine Bestätigung der Gastheorie, die $n=\frac{1}{2}$ in (2.3.16c) forderte⁹⁵:

$$\mu = 0.000186 (1 + \frac{1}{2}(1/273) \Theta) = \mu(T_0) (1 + 0.0018 \Theta) \quad (2.3.17b)$$

Meyer sah deshalb aber keine Notwendigkeit zur Aufgabe der gesamten Theorie, sondern dachte nur an "eine kleine Modifikation" durch Berücksichtigung der inneren Bewegungen der Atome.⁹⁶ Jedenfalls gab es für ihn nicht "den geringsten Grund, der uns zu einer so tief einschneidenden Umgestaltung - wenn nicht Verunstaltung - zwänge, wie sie Maxwell mit seiner älteren Theorie vornahm, als er die neue aufstellte."⁹⁷ Ganz im Gegenteil glaubte er ihre

grundlegenden Prinzipien in wenigen Gleichungen ausdrücken zu können, "also ein Schritt weiter zu dem Ziele, welches der neuen mathematischen Physik von ihrem Schöpfer Laplace vorgezeichnet ward, alle Gesetze der Natur in immer weniger und schliesslich in eine einzige mathematische Formel zusammenzufassen.""

Ausgehend von seiner Beschäftigung mit der Flüssigkeitsreibung war er fast zwangsläufig auf die kinetische Gasttheorie gestoßen. Gerade das von Meyer weiterentwickelte Verfahren der schwingenden Scheiben eignete sich auch zur Messung der Luftreibung. In dieser Entwicklungsphase der Theorie erwies sich die bei ihm anzutreffende Kombination von experimentellem Geschick und solider Ausbildung in der mathematischen Physik als besonders fruchtbar." Mit Hilfe der Gasttheorie hoffte Meyer sogar den Weg zu einer ganzheitlichen Naturbeschreibung finden zu können. Das Experiment verlor in dieser Sicht etwas von seiner vorherrschenden Rolle.

3. Das Laboratorium von Gustav Magnus

3.1 Der Chemiker und Physiker Gustav Magnus

Die kinetische Gastheorie erhielt im Jahr 1875 durch zwei gemeinsame Untersuchungen von August Kundt und Emil Warburg weiteren Auftrieb. Anders als Meyer, der seine Forschungstätigkeit fast ausschließlich diesem Gebiet widmete, wandten sie sich bald danach wieder ganz anderen Fragen zu. Aber auch im späteren Urteil der Kollegen wurden diese Beiträge als die bedeutendsten ihrer erfolgreichen Laufbahnen genannt.¹ Begonnen hatten beide mit der Physik im Laboratorium von Gustav Magnus, der dieses Fach in Berlin lange Zeit maßgeblich geprägt hatte (s. auch S. 19). Zum Verständnis des wissenschaftlichen Umfeldes, in dem Kundt und Warburg sowohl promovierten als auch habilitierten, folgt deshalb ein biographischer Abschnitt über Magnus.

Seit 1822 studierte der 1802 in Berlin geborene Gustav Magnus an der Berliner Universität hauptsächlich Chemie und erwarb dort im September 1827 den Doktorgrad mit einer Abhandlung über das Element Tellur.² Unmittelbar anschließend reiste er nach Stockholm zu Berzelius, der ihn bei einem Aufenthalt in Berlin im Sommer jenes Jahres in sein Laboratorium eingeladen hatte.³ Das war eine besondere Auszeichnung, denn der berühmte Chemiker konnte schon aufgrund der kleinen Räumlichkeiten nur ein bis zwei Schüler gleichzeitig aufnehmen.⁴ Dabei handelte es sich nicht um Anfänger, sondern stets um junge, bereits qualifizierte Wissenschaftler, die durch die gemeinsame Arbeit lernten. So konnten dort zuvor schon mit Mitscherlich, Heinrich und Gustav Rose, Gmelin und Wöhler einige der wichtigsten Vertreter einer Generation deutscher Chemiker ihre Kenntnisse und Fähigkeiten vervollkommen.⁵ Die auch für die damalige Zeit sehr spärliche Ausstattung stellte besonders

hohe Anforderungen an das experimentelle Geschick.⁶ Die große Bedeutung dieses Ausbildungsabschnitts für Magnus und die Vertrautheit mit Berzelius lassen sich an dem Briefwechsel erkennen, den die beiden seitdem führten.⁷ Ein relativ kurzer Aufenthalt in Paris, von dem er im Frühjahr 1829 nach Berlin zurückkehrte, verlief eher enttäuschend.⁸

Im Dezember 1830 stellte er den Antrag auf Habilitation für Chemie und Technologie.⁹ Neben seiner Dissertation konnte er zehn Veröffentlichungen, hauptsächlich aus der anorganischen Chemie, vorweisen. Die Habilitationsvorlesung vom 28.12.1830 mit dem Thema "Die Lehre von den Dämpfen" behandelte größtenteils technische Fragen, die mit der Entwicklung der Dampfmaschine zusammenhingen.¹⁰ Seine erste Lehrveranstaltung war eine praktische chemische Übung, zu der sich acht Studenten, zumeist Mediziner, einfanden.¹¹ Im Sommersemester 1832 begann er mit der Vorlesung über Technologie¹², die er nun jeden Sommer hielt. Magnus erläuterte hier die verschiedenen industriellen Fertigungsverfahren. Er gliederte seine Darstellung nach der Herkunft der Ausgangsstoffe. Dem mineralogischen Teil, der sich u.a. mit der Glas- und Porzellanproduktion befaßte, folgte die Besprechung derjenigen Fabrikationen, die auf organischen Substanzen basierten, wie z.B. die Bierbrauerei oder Gerberei. Experimente ergänzten seinen Vortrag. Außerdem war eine Exkursion zu einigen Betrieben der Umgebung stets Bestandteil dieser Lehrveranstaltung.¹³

Im Jahr 1833 gelang es Magnus, mit dem Ministerium eine Vereinbarung über den Erwerb von Geräten für seine Vorlesungen zu treffen. Er bekam eine feststehende jährliche Zuwendung. Die Anschaffungen gehörten dann zwar dem Staat, aber unter Wahrung eines Besitzrechts für Magnus auf Lebenszeit.¹⁴ Die erste Vorlesung über Physik hielt er im Wintersemester 1833/34.¹⁵ Dieses Fach besaß

noch kein so eigenständiges Profil, daß die Lehre an besondere Qualifikationen wie etwa an eigene physikalische Forschung gebunden gewesen wäre.¹⁶ In jenem Semester wurde die Physik von sieben Dozenten gelesen.¹⁷ Magnus konnte sich in dieser Konkurrenz um die Studenten, bei denen es sich zumeist um angehende Mediziner oder Pharmazeuten handelte, mit 40 bis 50 Hörern durchaus behaupten.¹⁸ Verglichen mit 100 bei Mitscherlich war das respektabel, denn dieser hatte als Mitglied der Kommission für die Staatsprüfungen eine wesentlich bessere Ausgangsposition. Außerdem stand Mitscherlich sogar ein speziell für die Vorlesungen angestellter Gehilfe zur Verfügung.¹⁹

Im Frühjahr 1834 wurde Magnus zum außerordentlichen Professor für Technologie ernannt.²⁰ Mit ungefähr 70 Hörern war seine Vorlesung nun so stark besucht wie bislang noch nie. Die Industrieexkursion mußte deshalb zweimal durchgeführt werden.²¹ In der Physikvorlesung des nächsten Semesters saßen etwa 80 Hörer.²² Magnus hatte sich als Dozent offenbar einen guten Ruf erworben. Die Themen seiner wissenschaftlichen Tätigkeit waren fast alle den verschiedenen Teilgebieten der Chemie zuzurechnen, sei es der anorganischen, organischen oder der physiologischen Chemie. H. Rose wies auf vier davon besonders hin, als er 1839 offiziell vorschlug, Magnus zum Mitglied der Berliner Akademie der Wissenschaften zu berufen.²³ Die Ergebnisse seiner Forschung fanden also die Anerkennung der Kollegen.

Durch die Heirat mit der Verlegerstochter Bertha Humblot veränderten sich 1840 seine Lebensumstände.²⁴ Im Sommer kaufte er deshalb ein Haus am Kupfergraben, das ganz nah an der Universität gelegen war.²⁵ Darin richtete er sich einen eigenen Hörsaal sowie ein Laboratorium ein. Überdies konnte er das physikalische Kabinett, zu dessen Vorstand ihn das Ministerium 1842 ernannte²⁶, ebenfalls

dort unterbringen. Auf Druck der anderen Physik lehrenden Professoren A.Erman und Dove wurde es ab 1844 im Universitätsgebäude aufgestellt.²⁷ Allerdings durften sie die Geräte auch dann nur gegen einen Leihschein entnehmen.²⁸ Abgesehen von dieser Formalität fühlten sie sich in der Nutzung des Kabinetts durch Magnus behindert.²⁹ Er versuchte offenbar den Vorteil zu wahren, den ihm der Besitz der Sammlung verschaffte.

Im April 1843 begann er in seinem Haus mit einer neuartigen Lehrveranstaltung, die als physikalisches Kolloquium bezeichnet wurde.³⁰ Sie war privat und folglich nicht im Vorlesungsverzeichnis enthalten. Magnus traf sich im Abstand von ein oder zwei Wochen mit den Teilnehmern, um nach dem Herumreichen der neuesten Veröffentlichungen bei Tee und Gebäck den aktuellen Stand eines Gebietes zu diskutieren.³¹ Die Studenten erhielten so Einblick in die wichtigen Fragestellungen der Forschung, und gewiß half es auch Magnus, sich auf dem laufenden zu halten. In 27 Jahren besuchten insgesamt 268 Teilnehmer das Kolloquium.³² Allerdings ging es in diesem Kreis etwas steif und förmlich zu.³³ Sicherlich war dies für eine Anzahl jüngerer Naturforscher einer der Gründe, einen unabhängigen und ungezwungeneren Diskussionsrahmen zu schaffen. Das führte 1845 zur Gründung der "Berliner Physikalischen Gesellschaft". Sie verwirklichte die bereits von Magnus beabsichtigte Herausgabe eines Referatenorgans³⁴, das "Fortschritte der Physik" genannt wurde. Im Geleitwort des ersten Bandes dankte man Magnus ausdrücklich, da von ihm die Idee zu der neuen Vereinigung ausgegangen sei.³⁵ Aber möglicherweise sollte es eher darüber hinwegtäuschen, daß Magnus dieses Unternehmen nicht besonders gern sah.³⁶

In der akademischen Karriere stand der Schritt zur ordentlichen Professur noch aus. Nachdem der Extraordinarius für Physik

H.W.Dove Berufungen nach Jena und Freiburg erhalten hatte, bemühte sich die Fakultät, ihn mit einem Ordinariat in Berlin zu halten. In ihrem Schreiben an das Ministerium vom 21.2.1844 empfahl sie für diesen Fall, auch Magnus in gleicher Weise zu berücksichtigen. Sie wies auf dessen ausgezeichneten Ruf im In- und Ausland hin sowie auf die Bedeutung der von ihm in der Lehre vertretenen Technologie und betonte, daß er als Vorstand eines physikalischen Kabinetts ohnehin den Rang eines Ordinarius haben sollte.³⁷ Der Minister Eichhorn antwortete im Prinzip zustimmend, machte aber finanzielle Probleme geltend, da es statt der vorgesehenen 17 bereits 29 ordentliche Professoren an der Berliner Universität gäbe.³⁸ Die Fakultät wiederholte ihren Antrag jedoch am 18.7.1844 mit dem Argument der erst kürzlich erfolgten Berufung des Direktors der Berliner Sternwarte Encke.³⁹ Am 21.1.1845 kam der Bescheid des Ministers mit der Ernennung von Dove zum ordentlichen Professor für Physik und der von Magnus für Technologie.⁴⁰

Die beschriebenen Aktivitäten von Magnus in der Lehre werden dazu beigetragen haben, daß er sich nunmehr auch in der Forschung in wachsendem Maße der Physik zuwandte. Seine Stärke lag in besonders sorgfältig durchgeführten Experimenten. Beispielhaft dafür ist die Untersuchung über die Wärmeausdehnung der Gase.⁴¹ Sie erfolgte 1841 beinahe gleichzeitig mit den Versuchen von Regnault und erbrachte eine gegenseitige Bestätigung der Resultate. Die Fragestellung hatte sich aus Diskrepanzen der Meßergebnisse von Gay-Lussac, Dalton und Rudberg ergeben.⁴² Charakteristisch für die Arbeitsweise von Magnus ist die Abhandlung von 1852 "Ueber die Abweichung der Geschosse".⁴³ Hier klärte er den später nach ihm benannten Effekt. Bereits Euler und Poisson hatten sich vergeblich darum bemüht herauszufinden, weshalb ein kugelförmiges Geschöß nicht die erwartete Wurfparabel beschrieb. Magnus erkannte die

Ursache in einer Rotation der Kugel. Sie führt dabei die Luft mit und wird folglich asymmetrisch von ihr umströmt. Aufgrund seiner vorangegangenen Arbeit zur Hydraulik⁴⁴ wußte Magnus, daß daraus eine ablenkende Kraft resultiert. Für die Demonstration im Labor konstruierte er einen Miniaturversuch, bei dem der Effekt an einem rotierenden Zylinder, der die Kugel ersetzte, unter der Wirkung eines Luftgebläses, das den Fahrtwind simulierte, beobachtet werden konnte.⁴⁵ Für Magnus war das Problem mit solch einer qualitativen Erklärung abgeschlossen. Eine mathematisch-quantitative Betrachtung lag außerhalb seines Interesses und seiner Möglichkeiten. Dieser Seite der Physik stand er ohnehin etwas reserviert gegenüber. Manche Hypothesen erinnerten ihn an die spekulativen Gedankengänge der idealistischen Naturphilosophie, von der er bei der Beerdigung Hegels im Jahr 1831 gehofft hatte, sie würde nun ebenfalls zu Grabe getragen.⁴⁶ So beurteilte Magnus die Schrift von Helmholtz zur Energieerhaltung noch 1858 ausgesprochen negativ, weil er die darin entwickelten Gedankengänge als nicht empirisch begründet ansah und deshalb als willkürlich empfand.⁴⁷ Der neuen Gasttheorie begegnete er nicht weniger skeptisch. Er glaubte zwar, daß Wärme auf Bewegungen beruhe und betrachtete sich in diesem Sinn auch als einen Anhänger der mechanischen Wärmetheorie. Eine Aussage über die Art der Bewegung schien ihm jedoch bei dem damaligen Kenntnisstand nicht möglich zu sein.⁴⁸ In dem Zeitraum von 1860 bis zu seinem Tod 1870 arbeitete er hauptsächlich über die Wärmeerscheinungen. Die Beobachtung von Grove, daß ein unter Strom stehender Platindraht in einer Wasserstoffatmosphäre weniger glühte als in Luft⁴⁹, veranlaßte Magnus 1860 zu einer eigenen Untersuchung dieses Effekts.⁵⁰ Als Behältnis für den Draht und das Gas benützte er enge Röhren von nur 1 mm Durchmesser, was die Entstehung von Strömungen verhindern sollte.

Er erhielt das gleiche Resultat wie Grove. Daraus folgerte Magnus, daß auch Gase die Wärme zu leiten vermögen. Er dachte an den von den Metallen bekannten Vorgang, wo "eine Fortpflanzung der Wärme von Theilchen zu Theilchen"⁵¹ stattfindet. Hier unterschied er sich von der kinetischen Gastheorie, die eine Übertragung durch die Moleküle selbst annahm.⁵² Bei einem weiteren Experiment brachte Magnus eine mit Gas gefüllte größere Glasröhre, in deren Mitte sich die Kugel eines Thermometers befand, in Wasserdampf von 100°C. Er bestimmte dann für mehrere gasförmige Stoffe die Zeiten, während der die Anzeige des Thermometers von 20 °C auf 80°C bzw. 90°C stieg. Im Fall des Wasserstoffs ging es am raschesten.⁵³ Als quantitatives Ergebnis einer anderen Versuchsreihe verwendete er die Temperatur, die sich nach der Erwärmungsphase einstellte. Bei Wasserstoff wurde der größte Wert erreicht. Diese Temperatur war unter Normaldruck für alle Gasfüllungen bis auf Wasserstoff geringer als die im nahezu evakuierten Gefäß.⁵⁴ Magnus meinte aber deshalb nicht, daß nur Wasserstoff die Wärme leite. Er interpretierte die Abnahme der Wärmezufuhr als Absorption der Wärmestrahlung, die durch die Leitung nicht kompensiert werden könnte. Den Arbeiten der folgenden Jahre läßt sich entnehmen, daß Magnus auch bemüht war, Aufschlüsse über die Art der Wärmebewegung zu erhalten. Diese konnte er sich am ehesten als transversale Schwingungen vorstellen.⁵⁵ Er war indes viel zu vorsichtig, um sich definitiv festzulegen.⁵⁶

Seit 1842 bot Magnus einzelnen Studenten die Möglichkeit, ihre wissenschaftlichen Untersuchungen in seinem zwei bis drei Personen Platz bietenden Laboratorium durchzuführen.⁵⁷ Ein Honorar verlangte er nicht.⁵⁸ Im Verlauf von gut 20 Jahren entstanden dabei etwa 30 gedruckte Abhandlungen.⁵⁹ Das mit staatlicher Unterstützung 1863 in seinem Haus eröffnete größere physikalische

Laboratorium ermöglichte einen umfangreicheren Lehr- und Forschungsbetrieb.⁶⁰ Dessen fruchtbare Atmosphäre dokumentieren die ungefähr 50 Veröffentlichungen, die bis 1870 aus ihm hervorgingen.⁶¹ Mit der Anstellung eines Assistenten erhielt es in gewisser Weise den Charakter eines Universitätsinstituts, aber ebenso wenig wie der Assistent war es im amtlichen Verzeichnis enthalten. Es handelte sich demnach auch weiterhin um eine private Einrichtung.⁶² Ein Student wurde nur dann aufgenommen, wenn er in der Lage war, den Plan zu einem selbständigen physikalischen Projekt vorzulegen, das Magnus sinnvoll erschien.⁶³ Er suchte also keine Gehilfen zur Ausarbeitung der eigenen Ideen. Die Gruppe der Studenten von Magnus war deshalb in wissenschaftlicher Hinsicht heterogen, und ihre Beiträge wiesen weder methodisch noch inhaltlich die Merkmale einer gemeinsamen Schule auf.⁶⁴

3.2 Die Laufbahn von August Kundt bis zur Gründung der Straßburger Universität 1872

Im Jahr 1859 begann der 19jährige August Kundt aus Schwerin in Leipzig mit dem Studium der Naturwissenschaften. Zu Ostern 1861 wechselte er nach Berlin, wo er sich anfangs besonders der Mathematik und Astronomie widmete. Er hörte hier bei Encke, Kummer und Foerster, unter dessen Anleitung er auf der Sternwarte in die praktische Astronomie eingeführt wurde.¹ In diesem Umfeld entstanden seine beiden ersten Publikationen. Sie behandeln optische Fragen.² Durch die Eröffnung des Laboratoriums im Haus von Magnus gab es seit Ostern 1863 eine Möglichkeit für ihn, dem Interesse an der experimentellen Physik nachgehen zu können. Innerhalb eines Jahres fertigte er dort seine Dissertation über die Bedingungen an, unter denen polarisiertes Licht in unpolarisiertes umgewandelt wird.³ Der als Erstgutachter fungierende H.Dove beurteilte sie inhaltlich positiv, bewertete die sprachlichen Mängel der lateinisch geschriebenen Arbeit jedoch als so gravierend, daß Kundt eine Neufassung erstellen mußte.⁴ Zu jener Zeit hatte ein Doktorand an preußischen Universitäten seine Dissertation in Latein abzufassen. Erst 1867 erlaubte eine Verfügung den Gebrauch der deutschen Sprache, wenn sich der Kandidat dafür beim mündlichen Examen einer zusätzlichen Lateinprüfung unterzog.⁵ Kundt, der auf diese Alternative noch nicht zurückgreifen konnte, wurde mit einer Überarbeitung zum Rigorosum zugelassen, das am 19.4.1864 stattfand.⁶ Dove fragte ihn hier nach den Gesetzen der Elastizität und besprach u.a. auch die Schallgeschwindigkeit. Magnus ging dann auf Galvanismus, Elektromagnetismus und die Wärmelehre ein. Kummer folgte mit der Mathematikprüfung, was für einen Kandidaten aus der Physik die Erörterung der mechanischen

Prinzipien bedeutete. Den Abschluß bildete eine Unterredung mit dem Philosophen Trendelenburg über die Grundlagen dieses Faches, bei der spezielle Kenntnisse aber nicht vorausgesetzt wurden. Aufgrund der gezeigten Leistungen promovierte ihn die Fakultät mit der Note "magna cum laude".⁷

Kundt besaß jetzt nicht nur ein sehr gutes Zeugnis, sondern durch seine Tätigkeit im Labor auch das Vertrauen von Magnus, der ihn nun zu seinem Privatassistenten machte.⁸ Der Aufgabenbereich dieser Position umfaßte sowohl die Unterstützung von Magnus bei den Vorlesungen über Physik und Technologie als auch die Arbeit im Labor. Dazu gehörte insbesondere die Anleitung der Studenten, wobei Kundts selbstbewußte und ungezwungene Art der Kommunikation bald den Umgangston bestimmte.⁹ Mit der Anstellung eines ausschließlich für die Vorlesungen zuständigen zweiten Assistenten im Winter 1865 konnte er sich auf das Labor konzentrieren sowie die eigene Forschung intensiver vorantreiben.¹⁰ Es waren Themen aus der Optik und der Akustik¹¹, die ihn beschäftigten. Dabei gelang es Kundt, eine neue Methode zur Messung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen zu entwickeln. Eine erste Mitteilung ging im Mai 1865 an die Berliner Akademie der Wissenschaften.¹² Im September berichtete er darüber auf der Naturforscherversammlung in Hannover.¹³ Am 3.11.1865 führte er das Verfahren der "Berliner Physikalischen Gesellschaft" vor.¹⁴ So wurde Kundt in der Fachwelt rasch bekannt. Die Wirkungen schwingender Stäbe und Röhren waren schon zuvor Ausgangspunkt und Gegenstand seiner Untersuchungen gewesen.¹⁵ Ein aufgestreutes feines Pulver sammelt sich infolge der transversalen Stöße an den Knotenlinien und macht auf diese Weise die Schwingungsformen sichtbar. In dem Fall "tönender Platten" ergab sich die bereits vertraute Erscheinung der Chladnischen Klangfiguren. Faraday hatte entdeckt, daß derartige

Staubfiguren unter gewissen Umständen auch durch Luftströmungen entstehen, die ihrerseits wiederum von den Vibrationen eines festen Körpers herrühren. Es handelt sich also um einen Sekundäreffekt und nicht um die von Kundt gesuchten Spuren der Schallwellen selbst. Solche fand er beim Reiben einer geschlossenen Glasröhre. Die darin befindliche Luftsäule wurde zu stehenden Schwingungen angeregt und ein ebenfalls enthaltenes Pulver konzentrierte sich an den Schwingungsknoten, was eine direkte Bestimmung der Wellenlänge erlaubte. Diese Staubfiguren kamen in einer evakuierten oder an beiden Enden offenen Röhre nicht zustande. Wurde die Luft durch ein anderes Gas ersetzt, gab es eine Veränderung in der Anzahl der Staubanhäufungen. Das belegte, daß tatsächlich die bewegte Luft und nicht etwa das Glas für den Effekt verantwortlich war. Kundt erklärte den Anregungsmechanismus mit den Stößen der schwingenden Röhrenenden gegen die Luft, weshalb das Glas und die Luft dieselbe Frequenz besitzen sollten. Das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten in den beiden Medien ist nun dem leicht zu messenden Verhältnis der Wellenlängen gleich. Die Länge der Glasröhre entspricht einer halben Wellenlänge, wenn sie in der Mitte festgehalten und an einem Ende gerieben wird. Kundt zählte in dieser Versuchssituation etwa 16 Staubanhäufungen, also halbe Wellenlängen. In Glas vollzieht sich die Ausbreitung des Schalls demzufolge 16mal schneller als in der Luft.¹⁶ Auf ähnliche Weise konnte er die relativen Schallgeschwindigkeiten in anderen festen Körpern bestimmen. Dazu wurde ein Stab des zu untersuchenden Materials, dessen Länge durch geeignete Befestigungen einer halben Wellenlänge oder einem Vielfachen davon entsprach, ein Stück in das offene Ende einer einseitig verstöpselten Glasröhre geschoben. In dem abgedichteten Luftvolumen bildeten sich nach der Anregung des Stabes zu Schallschwingungen die

Staubfiguren. Neben den Kundtschen sind zum Vergleich die heutigen auf 20°C bezogenen Werte in Klammern angefügt. In Kundts Arbeit fehlte dagegen die Temperaturangabe. Drei unabhängige Versuche lieferten jeweils übereinstimmend für Messing 10,87 (10,2), für Glas 15,24¹⁷, bei einem Versuch für Kupfer ergab sich 11,96 (11,3) und bei drei verschiedenen Stahlstangen 15,34 (14,8). Die Differenzen zu den damals bekannten Zahlen lagen unter 10%, was Kundt angesichts der wahrscheinlich abweichenden Materialzusammensetzungen durchaus noch als zufriedenstellend empfand. Kleinere Ungenauigkeiten räumte er auch wegen der von ihm nicht kontrollierten Temperatur ein. Eine entscheidende Bestätigung des Verfahrens sah er aber in der guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Seine Veröffentlichung vermittelt den Eindruck, daß es ihm weniger um die exakten Schallgeschwindigkeiten ging als vielmehr um eine Möglichkeit, verborgene Naturvorgänge sichtbar zu machen.¹⁸ Das Experiment lief für die Gase etwas anders ab, da er diese nacheinander in die Glasröhre einfüllen mußte. Die relativen wieder auf die Luft bezogenen Werte erhielt er deshalb nicht mehr aus einem einzigen Versuch. In Klammern wiederum die heutigen Angaben: CO₂ 0,8 (0,75), Leuchtgas 1,6 (1,5), H₂ 3,56 (3,8)¹⁹. Aus der Schallgeschwindigkeit eines Gases v_s kann nach

$$v_s = \sqrt{(p/\rho) (c_p/c_v)} \quad (3.2.1)$$

das Verhältnis der spezifischen Wärmen berechnet werden. Dabei bezeichnet p den Druck und ρ die Dichte. Kundt setzte diese Arbeit mit umfassenderen Untersuchungen der Gase fort. Sie zog sich aufgrund nur mühsam zu beseitigender Fehlerquellen weitaus länger hin, als er anfangs erwartet hatte. Erst nach über zwei Jahren gelangte er zu befriedigenden Resultaten.²⁰ Das blockierte seine wissenschaftliche Produktion jedoch nicht. Vier weitere Aufsätze entstanden in diesem Zeitraum.²¹ Seine Publikationsliste wies

somit bereits elf verschiedene Abhandlungen auf²², was für eine Habilitation eine ausreichende Basis darstellte. Kundt brauchte daher nicht den Abschluß der Experimente über die Staubfiguren in Gasen abzuwarten, um die Fakultät von seiner Qualifikation überzeugen zu können. Sicherlich verstärkte die relativ frühe Heirat des Vorjahres²³ den finanziellen Druck, der eine Verbesserung des akademischen Ranges verlangte. Am 11.2.1867 formulierte Kundt den Habilitationsantrag. Daraufhin benannte die Fakultät am 16. Februar mit Dove und Magnus die gleichen Gutachter wie bei der Promotion.²⁴ Anfang März lagen deren Stellungnahmen vor. Dove gab zu jeder Veröffentlichung von Kundt einen kurzen Kommentar und bescheinigte ihm, "wichtige physikalische Fragen durch zweckmäßig erdachte und geschickt ausgeführte Versuche zu erledigen und die aus ihnen hervorgehenden Fragen klar und präzise darzustellen."²⁵ Magnus kleidete das Lob für den wahrscheinlich besten seiner Studenten in die Worte: "... er ist, was sich selten findet, ein Mann von eigenen, selbständigen Ideen."²⁶ Den Habilitationsvortrag hielt Kundt am 25. März "über Methoden, welche man zur Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles angewandt hat". Nach der üblichen daran anknüpfenden Unterredung, die wiederum Dove und Magnus führten, beschloß die Fakultät die Habilitation.²⁷ Durch das breite Angebot der Berliner Universität waren Kundts Profilierungsmöglichkeiten in der Lehre eingeschränkt. In den Spezialkollegien, die er abhalten konnte, durfte er nur wenig Hörer erwarten.²⁸

Die Polytechnische Schule in Zürich suchte mittlerweile einen Nachfolger für R. Clausius, der einen Ruf nach Würzburg angenommen hatte. Die Bemühungen J. Stefan zu gewinnen scheiterten, denn der verspürte als gut dotierter Direktor des physikalischen Instituts der Universität Wien wenig Neigung zu einem Wechsel.²⁹ Die

Berufungsverhandlungen gehörten zum Aufgabenbereich des direkt dem Bundesrat unterstellten Präsidenten des Schweizerischen Schulrates. Dies war seit 1857 der Jurist C.Kappler, der u.a. schon die Mathematiker Dedekind und Christoffel nach Zürich geholt hatte.³⁰ Sein Interesse galt insbesondere jüngeren Wissenschaftlern. Mit der Bitte um entsprechende Empfehlungen wandte er sich an G.Magnus und W.Weber in Göttingen. Magnus brachte dabei Kundt in die Diskussion, der unter den Nachwuchskräften ohne größere Lehrerfahrung "durch eigene Arbeiten am herausragendsten" sei.³¹ Es handelte sich hier nicht um das allzu wohlwollende Urteil eines Lehrers über seinen Lieblingsschüler, denn auch Weber führte Kundts Namen in einer Auswahl von sechs geeigneten Kandidaten an.³² Kurze Zeit später ging die Bewerbung von Kundt in Zürich ein. Er wies neben Magnus auf eine Reihe von Physikern hin, die über seine wissenschaftlichen Beiträge berichten würden: Dove, Poggendorff, Quincke (alle Berlin), Weber (Göttingen), Hankel (Leipzig), Knoblauch (Halle) und Jolly (München).³³ Dies dokumentiert auch das Interesse, das er im Verlauf der letzten Jahren in der Fachwelt zu erwecken vermochte. Weiterhin betonte er seine Kompetenz für die gesamte Physik. Tatsächlich aber lag der Schwerpunkt seiner Neigungen und Fähigkeiten eindeutig bei den experimentellen Fragestellungen. Mit der mathematisch-theoretischen Richtung war er dagegen kaum in Berührung gekommen.³⁴ Der Entscheidungsprozeß in Zürich zog sich noch einige Zeit hin, bis ihn der Bundesrat schließlich am 9.3.1868 für zunächst zwei Jahre zum Professor der Physik ernannte.³⁵

Inzwischen brachte er seine Untersuchungen über die Schallgeschwindigkeiten der Gase zu einem vorläufigen Abschluß.³⁶ Eine Modifikation der ursprünglichen Versuchsanordnung hatte er bereits in der früheren Veröffentlichung erwähnt.³⁷ Die Glasröhre sollte

nicht mehr Gasbehältnis und Schallerzeuger zugleich sein, denn die dabei auftretenden Vibrationen störten die Regelmäßigkeit der Staubfiguren. Zur Anregung der Gasschwingungen verwendete Kundt deshalb eine zweite "tönende Röhre", die in der anderen, der "Wellenröhre", frei verschiebbar war und das Gasvolumen an einer Seite abschloß. Das bot außerdem den Vorteil, die Länge der Gassäule variieren zu können. Kundt führte die Experimente jetzt in einem Wasserbad durch, was eine exakte Temperaturangabe ermöglichte. Die nicht unerheblichen Streuungen der Ergebnisse überraschten ihn. Der nach zahlreichen Versuchsreihen endlich lokalisierte Fehler stellte das ganze Verfahren in Frage. Beim Ein- und Ausfüllen der verschiedenen Gassorten und dem Einsetzen in das Wasserbad kam es zwangsläufig zu kleinen mechanischen Veränderungen an der aus mehreren Teilen bestehenden Apparatur. Das verursachte Schwankungen der Tonhöhe. Aber nur im Fall ihrer Konstanz war das Verhältnis der Wellenlängen gleich dem der Schallgeschwindigkeiten. Kundt fand eine ebenso einfache wie originelle Lösung. Über die beiden Enden der tönenden Röhre schob er je eine Wellenröhre. Kautschuk sorgte an den Verbindungsstellen für einen luftdichten Abschluß und verhinderte außerdem die Übertragung der Schwingungen auf die Wellenröhren. Die eine davon füllte Kundt mit Luft, die andere mit dem zu untersuchenden Gas. In jedem einzelnen Versuch wurden so gleichzeitig in zwei Gasen gleicher Temperatur Schallschwingungen derselben Frequenz erzeugt. Das lästige Wasserbad konnte entfallen. Für die Genauigkeit der Methode sprach die geringe Differenz von 0,3% zwischen den Messungen der Wellenlängen in den beiden Röhren, wenn sie dasselbe Gas enthielten. Kundt überprüfte dann, welchen Einfluß der Durchmesser der Röhre, die Beschaffenheit ihrer Innenwand und die Menge des Pulvers auf die Ergebnisse hatten. Die Beherrschung aller experimentellen Details

stand für ihn offenbar im Vordergrund. Nach seiner eigenen Aussage war die Bestimmung des Verhältnisses der spezifischen Wärmen das eigentliche Ziel dieser Arbeit.³⁸ Dennoch beschäftigte er sich hier nur mit dem Testen des neuen Verfahrens. Werte für die Schallgeschwindigkeiten sucht man in der mit fast 70 Seiten bis dahin längsten Abhandlung von Kundt vergeblich. Er erwähnte lediglich, daß seine Resultate nicht mit den bekannten übereinstimmen³⁹ und vertröstete die Leser auf eine spätere Veröffentlichung⁴⁰, ein Versprechen, das er nicht einlöste.

Die Redaktion der "Fortschritte der Physik", die er im Vorjahr von Jochmann übernommen hatte, gab er vor dem Umzug nach Zürich im April 1868 wieder ab.⁴¹ Aufgrund einer Anfrage des Präsidenten Kappeler arbeitete er dort gleich zu Beginn seiner Tätigkeit zusammen mit Mousson, dem zweiten Professor für Physik, Vorschläge für eine Neugestaltung der Lehrpläne aus.⁴² Dabei waren die verschiedenen Studiengänge für Ingenieure und Lehrer zu berücksichtigen. In der höheren wissenschaftlichen Ausbildung sollte im Verlauf von vier Semestern eine Übersicht der wichtigsten physikalischen Theorien geboten werden. Es wird deutlich, daß Kundts rein experimentell orientierte Forschung keine Entscheidung gegen die Theorie war, die er nun auch selbst lehrte.⁴³ Ihre Bedeutung stand für ihn außer Frage. Der Tätigkeit im Labor galt aber zweifellos das besondere Interesse.⁴⁴ So entwarf er einige Wochen später ein Programm, das allein die praktischen Übungen der Studenten betraf.⁴⁵ Es ging ihm hier nicht nur um eine Ergänzung der Vorlesungen, sondern um die Vermittlung der wesentlichen Beobachtungs- und Meßmethoden durch ausgewählte Experimente. Als geeignet betrachtete er solche, die ein exaktes, in Zahlen angebbares Resultat erbrachten, was die Kontrolle einer größeren Studentenzahl erleichterte. Kundt verwendete seine Erfahrungen aus dem kleinen

Labor von Magnus und stellte sich außerdem auf die Erfordernisse eines wissenschaftlichen Großbetriebs ein. Die Messung der Schallgeschwindigkeiten in Gasen gehörte zu den 23 Versuchen, die Kundt für die Übungen vorschlug.

Das Problem der Bestimmung des Verhältnisses der spezifischen Wärmen verlor er nicht aus den Augen. F.Kohlrausch hatte zu jener Zeit mit 1,302 für Luft einen Wert erhalten, der von allen früheren, die um 1,41 lagen, deutlich abwich.⁴⁶ Die Meßvorgang lief so ab, daß Luft der Temperatur T_1 unter dem Druck p_1 aus dem Volumen V_1 adiabatisch in ein Gefäß mit dem Volumen V_2 expandierte. Die Temperatur ging dort auf T_2 zurück. Das darin vorhandene Barometer zeigte deshalb den niedrigeren Druck p_2 an. Danach stellte sich durch Wärmezufuhr der Umgebung wieder die Anfangstemperatur ein. Das Barometer stieg dabei auf p_3 . Mit der Poissonschen Gleichung $p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$, $k = c_p/c_v$ und der Beziehung von Boyle-Mariotte $V_1 = (p_3/p_1)V_2$ ergibt sich für das gesuchte Verhältnis der spezifischen Wärmen eine Gleichung, in der die Volumina nicht mehr vorkommen:

$$k = (\log p_1 - \log p_2) / (\log p_1 - \log p_3) \quad (3.2.2)$$

Kundt setzte W.Röntgen, der nach der Promotion an der Universität Zürich sein Mitarbeiter geworden war⁴⁷, auf dieses Problem an.⁴⁸ Röntgen wiederholte die Versuche von Kohlrausch und entdeckte den prinzipiellen Fehler.⁴⁹ Die Ausdehnung der Luft war durch Einflüsse der Gefäßwandung nicht adiabatisch erfolgt. Es gelang Röntgen, diesen Mangel zu beseitigen. Er fand schließlich $k = 1,405$.

Am 31.8.1869 erhielt Kundt das Angebot, die Professur in Würzburg zu übernehmen, wiederum als Nachfolger von Clausius.⁵⁰ Obwohl er sich finanziell verschlechterte⁵¹, wollte er es unbedingt akzeptieren. Insofern hatte er gar kein Interesse an weiteren

Verhandlungen, sondern teilte dem Präsidenten des Schulrats seinen Entschluß, Zürich zu verlassen, definitiv mit. Er drängte außerdem auf eine rasche Entpflichtung, aber der von ihm bereits für das Wintersemester geplante Wechsel⁵² wurde erst im Frühjahr 1870 möglich.⁵³ Kundts Entscheidung war keineswegs ungewöhnlich. Das Polytechnikum, das ohne Promotionsrecht ein weitaus geringeres Prestige als die Universitäten besaß⁵⁴, stellte für viele deutsche Wissenschaftler nur eine Durchgangsstation dar.⁵⁵

In Würzburg richtete sich Kundt ein optisches Laboratorium ein⁵⁶ und arbeitete insbesondere über die anomale Dispersion.⁵⁷ Er blieb hier kaum länger als in Zürich. Schon 1872 folgte er einem Ruf an die neugegründete deutsche Universität in Straßburg. Frankreich hatte Elsaß-Lothringen nach der militärischen Niederlage 1871 an das Deutsche Reich abtreten müssen. Eine Verbindung von Macht- und Kulturpolitik ließ den Plan entstehen, die französische Akademie in Straßburg zu einer deutschen Musteruniversität auszubauen. Der Reichstag beantragte daher am 24.5.1871 "mit Aufbietung grosser Mittel alle die wissenschaftlichen Capacitäten an diese Universität zu berufen, die irgendwie als Pionier des deutschen Geistes dort wirken können."⁵⁸ Mit der Durchführung der solchermaßen zu einer Angelegenheit des nationalen Prestiges erhobenen Aufgabe betraute Reichskanzler Bismarck am 30.Juli den ehemaligen badischen Ministerpräsidenten Franz Freiherr von Roggenbach, der am 3.Oktober einen vorläufigen Gründungsplan vorlegte.⁵⁹ Bei der Besetzung der Stellen ließ sich Roggenbach für die Mathematik von Kronecker und Weierstraß, für die Physik von Helmholtz und Kirchhoff beraten.⁶⁰ Am 22.Dezember konnte er mit den Berufungen beginnen.⁶¹ In einem Schreiben vom 29.Dezember offerierte er Kundt die Leitung des physikalischen Instituts.⁶² Der erkannte die besondere Chance eines völligen Neubeginns. Die Veränderung

bestehender Einrichtungen war weitaus schwieriger. Kundt hatte das noch in Berlin erfahren, wo Magnus dem zuständigen Ministerium 1867 die Notwendigkeit erläuterte, Sammlung, Laboratorium, Arbeitszimmer, Hörsäle sowie eine Amtswohnung gemeinsam unterzubringen.⁶³ Das dafür neuzuschaffende Institut wurde erst Helmholtz, dem Nachfolger von Magnus, im Rahmen der Berufungsverhandlungen von 1870 zugesagt.⁶⁴ Die Vergleichsmöglichkeiten, die der 31jährige Kundt aufgrund der drei ganz unterschiedlichen Wirkungsstätten Berlin, Zürich und Würzburg schon besaß, befähigten ihn zu einem sicheren Urteil über die Anforderungen des Faches Physik in Forschung und Lehre. Er nannte fünf notwendige Voraussetzungen:⁶⁵

1. Eine ausreichende Sammlung physikalischer Apparate. Daneben sollte sich der speziell für die Physik eingerichtete Hörsaal befinden.
2. Die Anstellung eines Assistenten.
3. Die Anstellung eines als Mechaniker ausgebildeten Dieners. Die Auswahl des Assistenten wie des Dieners müßte allein im Ermessen des Professors stehen.
4. Ein ständiger Etat für den Unterhalt und die Vermehrung der Sammlung.
5. Ein gut ausgestattetes Laboratorium.

Das letztere fehlte nach Ansicht von Kundt an den meisten deutschen Universitäten. Chemie und Physiologie hatten für ihn in dieser Hinsicht Vorbildcharakter.⁶⁶ Die wesentliche Bedingung aber war der dann auch zugesagte Bau eines physikalischen Instituts einschließlich Dienstwohnung.⁶⁷ Zur Vermeidung von Zeitverlusten wollte er die Tätigkeiten der Forschung, der Lehre und sogar des täglichen Lebens in einem Gebäude konzentrieren. Dementsprechend wünschte er sich eine ständige Verfügbarkeit des Dieners wie des

Assistenten. Beide sollten deshalb auch dort wohnen.⁶⁸ Bislang gab es im Deutschen Reich kein derartiges Institut, das als Modell hätte dienen können.⁶⁹ Auf einer solchen Grundlage hoffte Kundt, "eine gute experimentelle Schule zu schaffen."⁷⁰.

Die räumliche Expansion diente hauptsächlich der Ausbildung einer größeren Studentenzahl.⁷¹ Die inhaltlichen Veränderungen des Faches machten eine engere Kooperation mit der Mathematik erforderlich. Daher bat Kundt darum, bei der Auswahl eines mathematischen Physikers konsultiert zu werden.⁷² Christoffel, der am 25.2.1872 den Ruf auf einen der beiden Lehrstühle für Mathematik annahm⁷³, betrachtete die mathematische Physik als eines seiner Arbeitsgebiete. Eine zusätzliche Stelle erschien ihm insofern überflüssig, "abgesehen von dem Falle, daß eine Celebrität wie Herr Clausius für diese Disciplin gewonnen worden wäre".⁷⁴ Christoffel meinte, zusammen mit Kundt, den er noch aus Zürich kannte, das gesamte Spektrum des Faches Physik auszufüllen. Seine Aufgabe sah er in der Behandlung derjenigen Probleme, bei denen partielle Differentialgleichungen zu integrieren waren.⁷⁵ Kundt fand dagegen, daß eine weitere Arbeitsteilung erforderlich sei. So führte er die Wärmetheorie als das Beispiel einer Mathematisierung an, die keine für einen Mathematiker wie Christoffel interessanten Fragestellungen beinhaltet. Kundt suchte nach Entlastung: "Wenn ich selbst ein neues Cabinet einzurichten habe, wird mir in den ersten Jahren wenig Zeit bleiben, Bedürfnisse nach dieser Seite zu befriedigen. Ich glaube, es wird sich daher bald die Notwendigkeit herausstellen, einen 2ten Physiker, nennen wir ihn 'theoretischen Physiker', zu berufen."⁷⁶ Er empfahl Roggenbach, die "Idee der Berufung eines solchen nicht völlig aufzugeben, sondern nur hinauszuschieben"⁷⁷. Kundt dachte hier ursprünglich an Boltzmann, der seit 1869 einen Lehrstuhl für mathematische Physik in Graz

innehatte. Der finanzielle Rahmen erlaubte Straßburg indes nur ein Extraordinariat⁷⁸, womit die Auswahl praktisch auf Privatdozenten beschränkt war. Roggenbach brachte zwei Namen in die Diskussion: Johann Jacob Müller aus Leipzig und Emil Warburg aus Berlin.⁷⁹ Kundt setzte sich für Warburg ein, den er noch aus dem Laboratorium von Magnus kannte.⁸⁰ Nach einer positiven Stellungnahme der Fakultät am Ende des folgenden Sommersemesters kam es dann tatsächlich zur Einrichtung dieser Stelle und zu der Berufung Warburgs.⁸¹ In dem Beschluß wurde mit der Auflistung von Vorlesungsthemen wie Undulationstheorie, theoretische Akustik, Elektrostatik, Gastheorie und mechanische Wärmetheorie versucht, das neue Gebiet zu beschreiben und gegen die von Kundt und Christoffel vertretenen Inhalte abzugrenzen.⁸² Kundt gelang es also, den bei den Berufungsverhandlungen offen gebliebenen Punkt in seinem Sinne zu entscheiden. Das ganze wurde durch ein Gehalt abgerundet, das sogar höher gewesen sein soll als das von Helmholtz in Berlin.⁸³ Roggenbach konnte Kundt daher zu Recht schreiben: "Ich glaube Ihnen damit eine äußere Stellung bereitet zu haben, welche in Deutschland bisher noch keinem Ihrer Kollegen geboten wurde."⁸⁴ Am 1.5.1872 fand die feierliche Eröffnung der Straßburger Universität statt. Die Anwesenheit von Deputationen aus dem gesamten deutschen Sprachraum, so auch aus Österreich, der Schweiz und den russischen Ostseeprovinzen⁸⁵, unterstrich die beabsichtigte politische Mission.

3.3 Die Laufbahn von Emil Warburg bis zu seiner Berufung nach Straßburg 1872

Der 1846 in Altona geborene Emil Warburg begann im Alter von 17 Jahren mit seinem Studium in Heidelberg. Dort besuchte er u.a. die Vorlesungen von Bunsen, Helmholtz und Kirchhoff.¹ Kirchhoffs Experimentalphysik blieb ihm noch lange in guter Erinnerung.² Sie überzeugte ihn vermutlich davon, daß sich seine experimentellen und mathematischen Neigungen in diesem Fach am besten verbinden ließen. Nach drei Semestern setzte er sein Studium in Berlin fort, wo er von Magnus bald eine Erlaubnis zur Benutzung des Laboratoriums erhielt. Warburg beschäftigte sich dann vornehmlich mit akustischen Experimenten. Kundt unterstützte ihn dabei.³ Vielleicht hatte auch die Lektüre von Helmholtz' "Lehre von den Tonempfindungen"⁴ das Interesse Warburgs auf die Akustik gelenkt.⁵ Er spielte selbst Klavier⁶ und in diesem Buch wurde der Anwendungsbereich der Physik auf musikalisch-ästhetische Fragen ausgedehnt⁷.

Die im Januar 1867 eingereichte Dissertation "De Systematis Corporum Vibrantium"⁸ behandelte das Verhalten eines Schwingungssystems. Warburg beschränkte sich dabei nicht auf die experimentellen Aspekte des Themas. Er wollte den Vorgang ebenso mathematisch erfassen und glaubte, daß ihm dies mit der Formulierung einer gewöhnlichen Differentialgleichung vierter Ordnung gelingen wäre. Die Art der Durchführung fand jedoch nicht die Zustimmung der Gutachter. Dove meinte, die Dissertation angesichts der Schwierigkeit des gewählten Themas gerade noch als genügende Leistung bewerten zu können.⁹ Magnus gab in seinem kurzen Kommentar kein Votum ab, sondern bat Weierstraß um eine Stellungnahme.¹⁰ Nach dessen Ansicht waren die entwickelten Formeln nur

eine erste Näherung und keine strenge Erklärung der tatsächlichen Naturvorgänge.¹¹ Er stimmte aber auch für die Zulassung zur mündlichen Prüfung, die am 18.3.1867 stattfand.¹² Dove befragte Warburg über Elektrizität, Optik und Einzelheiten aus der Dissertation.¹³ Kummer folgte mit dem mathematischen Teil, in dem die Prinzipien der Mechanik diskutiert wurden. Für ein konkretes Beispiel mußte Warburg die Bewegungsgleichung aufstellen. Magnus beschränkte sich auf die Wärmelehre. Wichtig war ihm dabei der Zusammenhang von Licht und Wärme. Der Philosoph Trendelenburg führte das abschließende Gespräch. Die Fakultät promovierte Warburg daraufhin mit der Note "cum laude".¹⁴

In den folgenden Jahren setzte er seine Untersuchungen über die Wirkungen schwingender Körper im Laboratorium von Magnus fort.¹⁵ Am 21.3.1870 meldete er sich für die Habilitation an.¹⁶ Die kurz bevorstehende Vollendung einer neuen Abhandlung, die nur wenig später dabei hätte berücksichtigt werden können, wartete er nicht ab. Wahrscheinlich hoffte er noch auf ein Gutachten des inzwischen schwer erkrankten Magnus, der allerdings am 4.April verstarb.¹⁷ Dove und Weierstraß sollten nun die Leistungen von Warburg beurteilen.¹⁸ Dove skizzierte den aktuellen Stand der Forschung, um Warburgs Ergebnisse in einem größeren Zusammenhang zu erörtern.¹⁹ Danach hielt er "die Befähigung des Dr.Warburg zum Dozenten der Physik für unzweifelhaft, wenn sein vor der Fakultät zu haltender Vortrag dem Eindruck entspricht, welche seine wissenschaftlichen Arbeiten von der experimentellen Seite machen."²⁰ Weierstraß schloß sich dieser Ansicht ohne weiteren Kommentar an.²¹ Am 5.Mai sprach Warburg "Über die Reibung", woraufhin ihm die Fakultät die Lehrbefugnis erteilte.²² Mittlerweile hatte er die oben erwähnte Arbeit abgeschlossen, in der er sich einem anderen Themenkreis zugewandt hatte.²³ Mit der Überprüfung des Hagen-Poiseuilleschen

Gesetzes für Quecksilber wollte er herausfinden, ob hier der Effekt der bislang nur von Helmholtz und Piotrowski beim Wasser beobachteten Gleitung auftrat. Die spezielle Eigenschaft des Quecksilbers, Gefäßwände nicht zu benetzen, ließ eine Gleitung als möglich erscheinen. Gemäß (2.2.23) enthält die Ausflußmenge pro Zeiteinheit dann einen Beitrag, der zur dritten Potenz des Halbmessers der Röhre proportional ist. Die Messungen Warburgs erbrachten bei zwar nur geringen Veränderungen der Parameter Druck und Röhrenradius²⁴ keinen Nachweis für die Existenz einer Gleitung.

Zu dem im Wintersemester vorgesehenen Beginn seiner Lehrtätigkeit kam es nicht, weil er im Rahmen der allgemeinen Mobilmachung einberufen wurde und als Soldat am Deutsch-Französischen Krieg teilnahm. Seine Laufbahn war erst einmal unterbrochen²⁵ und es dauerte zwei Jahre bis er wieder etwas publizierte. Andererseits verdankte er es einer Folge dieses Krieges, daß er im Wintersemester 1872 Extraordinarius an der Universität Straßburg wurde.

4. Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase

4.1 Die Untersuchung von Kundt und Warburg Teil 1: Die Reibung

Zwischen Kundt und Warburg entwickelte sich bald eine enge wissenschaftliche Zusammenarbeit, die bis zu der 1876 erfolgten Berufung Warburgs nach Freiburg andauerte. Hier kam es zu einer Verbindung zweier gegensätzlicher Temperamente und verschiedener Forschungsstile. Kundt war sehr kommunikativ¹, und wie zuvor erläutert stand das Experiment im Mittelpunkt seines Interesses. Warburg wird dagegen als äußerst wortkarg, eher zurückhaltend geschildert.² Er interessierte sich stärker für die Theorie, die er Kundts Arbeitsteilung gemäß auch in der Lehre vertrat. So gingen die theoretischen Betrachtungen in den gemeinsamen Untersuchungen über die kinetische Gasttheorie allein auf ihn zurück.³ Ihre Veröffentlichungen erschienen zwar erst 1875, aber ein Aufsatz des Studenten A. Lehnbach aus dem Jahr 1873, der "auf Veranlassung der Herren Warburg und Kundt" entstand⁴, weist darauf hin, daß sie die dahin zielenden Fragestellungen schon zu jener Zeit zusammenformulierten. Es handelte sich um die Bestimmung der Wärmestrahlungsquantität. Die Messung der absoluten Wärmeleitfähigkeit der Luft durch Stefan von 1872⁵ ermöglichte Lehnbach die Reduktion dieses Einflusses. Zur Unterdrückung der Strömungen benutzte er sehr kleine Drücke bis hinunter zu 1 mm Hg. Es wurde angenommen, daß die von der kinetischen Gasttheorie geforderte Unabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Druck auch noch für diese Werte Gültigkeit besitzt. Von der Existenz einer unteren Schranke ging man allgemein aus und O.E. Meyer hatte schon früher an die dann größer werdenden Wirkungen der Gefäßwände gedacht (s.S.70-71). Kundt und Warburg wollten diese Situation jetzt genauer analysieren.⁶ Sie taten das ebenso für die Reibung, die der

Theorie geringere Probleme bereitete als die Wärmeleitung, bei der die schwer erfaßbaren innermolekularen Anregungen eine Rolle spielen. Spätestens im Frühjahr 1874 begannen sie mit den Experimenten.⁷

Kundt und Warburg zeigten, daß allein die Anwendung des Konzeptes der mittleren freien Weglänge auf stark verdünnte Gase die quantitative Festlegung der Grenzen jener von Maxwell entdeckten Gesetzmäßigkeiten erlaubte. Die Leistungsfähigkeit der kinetischen Gastheorie war also bislang noch gar nicht ausgeschöpft worden. Die technische Durchführung setzte Kenntnis der bisherigen Arbeiten von Maxwell und Meyer voraus.⁸ Deren Schwierigkeitsgrad schränkte die Zahl der Physiker vermutlich ein, die sich überhaupt mit diesem Gebiet beschäftigen konnten.⁹ Die Erläuterungen der Experimente bilden den eigentlichen Schwerpunkt der Publikation von Kundt und Warburg. Für die Behandlung der Theorie genügten ihnen 18 Seiten, was etwa ein Viertel des gesamten Umfangs ausmacht. Bei der knappen Darstellung der Rechnungen, die dem Leser viele Zwischenschritte überläßt, orientierten sie sich vielleicht an Maxwell, ohne aber gleichzeitig dessen übersichtliche Gliederung zu übernehmen.

Ganz ähnlich wie Meyer bestimmten sie die Reibung, die ein zur xy -Ebene paralleles Flächenstück in einem mit der Geschwindigkeit $u(z)$ in Richtung der x -Achse strömenden Gas erfährt. Für $u(z)$ setzten sie eine lineare Funktion an¹⁰:

$$u(z) = u(0) + bz \quad (4.1.1)$$

Ihre Idee bestand nun darin, daß eigentlich nur eine schmale Schicht der Dicke h beiderseits des Flächenstücks für die Reibung wichtig ist. Soll der Anteil der übrigen Schichten unterhalb der Meßgenauigkeit von etwa 1% liegen, ergibt dies eine Bedingung für h . Der Beitrag des positiven Halbraums ohne die benachbarte

Schicht der Dicke h wurde R_h^+ genannt. Man erhält ihn, wenn man in der durch $dx dy$ dividierten in Kugelkoordinaten transformierten rechten Seite der Gleichung (2.3.5a) für die untere Integrationsgrenze $r = h/\cos \vartheta$ setzt:

$$R_h^+ = \frac{\rho v}{4\pi\lambda} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{h/\cos \vartheta}^{\infty} u(r, \vartheta, \varphi) e^{-\frac{r}{\lambda} \cos \vartheta} \sin \vartheta \, dr \, d\vartheta \, d\varphi \quad (4.1.2)$$

Da gemäß (4.1.1) u nur von z abhängt, ist es sinnvoll $r = z/\cos \vartheta$ zu substituieren. Dann kann die Integration über φ direkt ausgeführt werden:

$$R_h^+ = \frac{1}{2} \rho \frac{v}{\lambda} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_h^{\infty} u(z) e^{-\frac{z}{\lambda \cos \vartheta} \sin \vartheta} \, dz \, d\vartheta \quad (4.1.3)$$

Die Substitution $\lambda = \frac{1}{\lambda \cos \vartheta}$ liefert dann den Ausdruck, mit dem Kundt und Warburg ihre Rechnung begannen:

$$R_h^+ = \frac{1}{2} \rho \frac{v}{\lambda} \int_h^{\infty} \int_{1/\lambda}^{\infty} u(z) \frac{e^{-\lambda z}}{\lambda^2 \lambda} \, d\lambda \, dz \quad (4.1.4)$$

Entsprechendes gilt für den negativen Halbraum. Die Differenz der beiden Ausdrücke ist unter Verwendung von (4.1.1):

$$R_h = \frac{1}{2} \rho \frac{v}{\lambda} b \left(\int_h^{\infty} \int_{1/\lambda}^{\infty} z \frac{e^{-\lambda z}}{\lambda^2 \lambda} \, d\lambda \, dz - \int_{-\infty}^{-h} \int_{1/\lambda}^{\infty} z \frac{e^{-\lambda z}}{\lambda^2 \lambda} \, d\lambda \, dz \right) \quad (4.1.5)$$

Nach der Integration über z :

$$R_h = \rho \frac{v}{\lambda^2} b \int_{1/\lambda}^{\infty} \frac{e^{-\lambda h}}{\lambda^4} (\lambda h + 1) \, d\lambda \quad (4.1.6)$$

Mit der Beziehung

$$\int \frac{e^{ax}}{x^n} \, dx = \frac{1}{n-1} \left(-\frac{e^{ax}}{x^{n-1}} + a \int \frac{e^{ax}}{x^{n-1}} \, dx \right) \quad n \neq 1 \quad (4.1.7)$$

wobei $\int \frac{e^{x^2}}{x} dx$ nicht mehr analytisch darstellbar ist, folgt schließlich das Ergebnis:

$$R_h = \frac{4}{3} \eta v_{lb} \left[e^{-\frac{h}{l} (1 + h/l - h^2/l^2)} + h^2/l^3 \int_{1/l}^{\infty} \frac{e^{-\lambda h}}{\lambda} d\lambda \right] \quad (4.1.8)$$

Der Ausdruck in der eckigen Klammer stellt somit das Verhältnis des gesuchten Anteils zur gesamten Reibung $R = \frac{4}{3} \eta v_{lb}$ dar. Für $h/l = 6$ erhält man etwa 0,5%. An dem meßbaren Betrag der Reibung dürfte sich also nichts ändern, solange die Gasschichten ober- und unterhalb des betrachteten Flächenstücks mindestens eine Dicke von 6 l besitzen. Bei kleiner werdender Dichte dehnen sich diese Schichten aufgrund der entsprechend größeren mittleren freien Weglänge räumlich aus und erreichen schließlich die Gefäßwände. Im Fall einer weiteren Verdünnung muß dann die Reibung abnehmen, da die geringere Teilchenzahl nicht mehr durch einen Impulstransport aus größeren Entfernungen kompensiert werden kann. So war es Kundt und Warburg möglich, die minimale Dichte, bis zu der die Druckunabhängigkeit der Reibung noch Gültigkeit hat, mit den Methoden der kinetischen Gastheorie zu berechnen.

In ihren Experimenten fanden sie jedoch schon bei deutlich höheren Dichten eine Verringerung der Reibungskraft. Dieser Widerspruch ließ sich im Rahmen der kinetischen Gastheorie auflösen, wenn es an den Gefäßwänden eine Gleitung gab. Wahrscheinlich ging diese Idee auf Warburgs frühere Untersuchung über die Gleitung des Quecksilbers zurück (s.S.99-100). Anders als Helmholtz, der den Effekt bei den Flüssigkeiten rein phänomenologisch eingeführt hatte (s.S.54), oder Meyer, der ihn in dieser Weise auch bei den Gasen benützte (s.S.72), konnten Kundt und Warburg jetzt eine mikroskopische Begründung für die Gleitung der Gase geben. Dazu betrachteten sie ein Gas zwischen zwei zur xy-Ebene parallelen

Wänden mit Abstand D . Während die eine davon ruht, bewegt sich die andere mit der Geschwindigkeit u_w in x -Richtung. Dies führt durch Reibung zur Ausbildung einer Gasströmung, deren Geschwindigkeitsverlauf wie oben als linear angesetzt wurde¹¹: $u(z) = u_w z/D$. Die Geschwindigkeit einer Gasschicht ist der Mittelwert der Geschwindigkeiten aller gleichzeitig darin vorhandenen Moleküle. Das der ruhenden Gefäßwand unmittelbar benachbarte Gas enthält Teilchen, die auf die Wand zulaufen und solche, die von ihr reflektiert werden. Die letzteren verlieren dabei einen Teil ihrer ursprünglichen Strömungsgeschwindigkeit. Der Grund dafür ist in unelastischen Stößen zu sehen, bei denen Energie verloren geht. Eine quantitative Aussage ist jedoch ohne die genaue Kenntnis der Wechselwirkung von Gasteilchen und Wand nicht möglich. Kundt und Warburg gingen in ihren weiteren Überlegungen von der Annahme aus, daß die reflektierten Teilchen keine Strömungsgeschwindigkeit mehr besitzen. Sie wollten hier "eine specielle Hypothese machen und an die Stelle des wahrscheinlich sehr complicirten Vorgangs der Natur einen einfacheren setzen."¹² Das erleichterte die folgenden Berechnungen. Für die Geschwindigkeit des direkt vor der Wand befindlichen Gases erhielten sie damit den kleinsten Wert, der aber durch die Mittelung über die Geschwindigkeiten aller Teilchen, also auch der, die auf die Wand zulaufen, immer noch größer als Null sein mußte. Ganz analog war die Überlegung für die bewegte Wand. An beiden gibt es demnach einen Geschwindigkeitssprung. Das Gas "gleitet" daher auf den Gefäßwänden. In deren Nähe, zu der die Schichten bis zu einem Abstand einer mittleren freien Weglänge zählen sollen, wird $u(z)$ von dem ansonsten linearen Verlauf abweichen. Die Fortsetzung des linearen Teils nimmt den Wert der Wandgeschwindigkeiten erst in einer Distanz hinter den Wänden an, die Kundt und Warburg als Gleitungskoeffizienten ν bezeichneten.

Im Unterschied zur Definition von Helmholtz (2.2.19a-b), ging hierbei statt der Ableitung am Gefäßrand diejenige im Abstand l ein:

$$u_w = u(D-1) + \frac{dv}{dr} \Big|_{z=D-1} (1 + \gamma) = u(D-1) + b(1 + \gamma) \quad (4.1.9a)$$

$$0 = u(1) - \frac{dv}{dr} \Big|_{z=1} (1 + \gamma) = u(1) - b(1 + \gamma) \quad (4.1.9b)$$

Für $1 < z < D-1$ gilt dann:

$$u(z) = \frac{v_w}{D+2\gamma} (z + \gamma) \quad (4.1.10)$$

Das Auftreten einer Gleitung vermindert demnach die Steigung der Geraden. So werden der Impulstransport und folglich die Reibung ebenfalls geringer:

$$R = \mu b = \mu \frac{v_w}{D+2\gamma} \quad (4.1.11)$$

Da der Impulsstrom wegen der Abwesenheit äußerer Kräfte innerhalb des Gases konstant ist, gibt dieser Ausdruck auch die in den Experimenten meßbare Reibung der Gefäßwand an. Zur quantitativen Bestimmung der Gleitung stellten Kundt und Warburg eine Bedingungs-gleichung für $u(z)$ auf. Diese Translationsgeschwindigkeit ergibt sich durch Integration über die Teilchengeschwindigkeiten des gesamten Gasraums, gewichtet zum einen mit der Wahrscheinlichkeit, die Schicht mit der Koordinate z zu erreichen (wie (4.1.4) ohne den Faktor $\beta \frac{\gamma}{\lambda}$ bei entsprechend veränderten Integrationsgrenzen von z) und zum anderen mit ihrer Verweildauer darin, die proportional zu $1/\cos \vartheta = 1/\lambda$ ist. Man erhält so (ohne die Grenzen von z):

$$\frac{1}{2} \int_{1/l}^{\infty} \int_0^{\infty} u(z) \frac{e^{-\lambda z}}{\lambda} d\lambda dz. \quad \text{Anschließend wird durch das Integral über die statistischen Gewichte dividiert. Es ist } 2 \left(\frac{1}{2} \int_{1/l}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda z}}{\lambda} d\lambda dz \right) = 1,$$

wobei der Faktor 2 die an der ruhenden Wand reflektierten Teilchen berücksichtigt. Die Entfernung bis zu der anderen Wand soll so groß sein, daß sie in den Rechnungen praktisch Unendlich gesetzt werden kann. Da die reflektierten Teilchen gemäß der obengenannten Hypothese keine Strömungsgeschwindigkeit mehr besitzen, verschwindet ihr Anteil und $u(z)$ läßt sich als Summe der Beiträge aus den Schichten x mit $z < x < \infty$ sowie $0 < x < z$ darstellen:

$$u(z) = \frac{1}{2} \int_z^{\infty} \int_{1/l}^{\infty} u(x) \frac{e^{-(x-z)\lambda}}{\lambda l} d\lambda dx + \frac{1}{2} \int_0^z \int_{1/l}^{\infty} u(x) \frac{e^{-(z-x)\lambda}}{\lambda l} d\lambda dx \quad (4.1.12)$$

Kundt und Warburg konnten jedoch aus dieser Integralgleichung $u(z)$ nicht streng bestimmen.¹³ So mußten sie zur Berechnung der Gleitung ein Näherungsverfahren verwenden. Für $z > 1$ wurde ein linearer Geschwindigkeitsverlauf angenommen. In dem Bereich $z \leq 1$ setzten Kundt und Warburg ihn in der höchsten Näherung aus drei linearen Teilstücken zusammen. Die physikalische Bedingung, die es dabei zu erfüllen galt, war die Konstanz des Impulsstroms μb für alle z . Den folgenden Hinweis auf die Äquivalenz dieser Aussage mit (4.1.12) gaben sie nicht. Nach Substitutionen in beiden Termen erhält (4.1.12) die Form:

$$u(z) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} u(x+z) \int_{1/l}^{\infty} \frac{e^{-x\lambda}}{\lambda l} d\lambda dx + \frac{1}{2} \int_0^z u(z-x) \int_{1/l}^{\infty} \frac{e^{-x\lambda}}{\lambda l} d\lambda dx \quad (4.1.13)$$

Mit der Einführung der Funktion

$$\Phi(x) = \int_{1/l}^{\infty} \frac{e^{-x\lambda}}{\lambda^2 l} d\lambda \text{ und ihrer Ableitung } \Phi'(x) = - \int_{1/l}^{\infty} \frac{e^{-x\lambda}}{\lambda l} d\lambda$$

wird dies zu:

$$u(z) = -\frac{1}{2} \int_0^{\infty} u(x+z) \Phi'(x) dx - \frac{1}{2} \int_0^z u(z-x) \Phi'(x) dx \quad (4.1.14)$$

Da $\lim_{x \rightarrow \infty} \Phi(x) = 0$ und $\Phi(0) = 1$, liefert eine partielle Integration:

$$\int_0^{\infty} \left(-\frac{\partial}{\partial x} u(x+z) \right) \Phi(x) dx + \int_0^z \left(\frac{\partial}{\partial x} u(z-x) \right) \Phi(x) dx = u(0) \Phi(z) \quad (4.1.15)$$

Damit gilt:

$$\frac{\partial}{\partial z} \int_0^{\infty} u(x+z) \Phi(x) dx - \frac{\partial}{\partial z} \int_0^z u(z-x) \Phi(x) dx = 0 \quad (4.1.16)$$

Die Differenz der beiden Integrale hängt also nicht mehr von z ab. Setzt man für $\Phi(x)$ die Definition ein und multipliziert den gesamten Ausdruck mit $\frac{1}{2} g \frac{v}{\lambda}$, so ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\frac{1}{2} g \frac{v}{\lambda} \left(\int_0^{\infty} \int_{\frac{1}{2}}^{\infty} u(x+z) \frac{e^{-x\lambda}}{\lambda^2} d\lambda dx - \int_0^z \int_{\frac{1}{2}}^{\infty} u(z-x) \frac{e^{-x\lambda}}{\lambda^2} d\lambda dx \right) =: C \quad (4.1.17)$$

Der erste Term stellt den Impulsstrom aus dem Bereich $x > z$, der zweite denjenigen aus $x < z$ dar. Die Differenz ist die Reibung $R(z) = C$. Zu ihrer Berechnung kann jedes beliebige z gewählt werden. Für eine Schicht $z > 7 \text{ l}$ hat die Geschwindigkeit an beiden Seiten bis zu einem Abstand von wenigstens 6 l einen linearen Verlauf mit der Steigung b . Wie oben gezeigt wurde, ist die Integration über diesen Bereich schon nahezu derjenigen bis Unendlich gleich. Deshalb darf die Grenze z im zweiten Integral durch Unendlich ersetzt werden:

$$C = g \frac{v}{\lambda} b \int_0^{\infty} \int_{\frac{1}{2}}^{\infty} x \frac{e^{-x\lambda}}{\lambda^2} d\lambda dx = \frac{1}{2} g v l b = \mu b \quad (4.1.18)$$

In dem ersten Schritt des Näherungsverfahrens setzten Kundt und Warburg den linearen Verlauf der Geschwindigkeit bis zur Wand fort. An dieser ergab sich für die Reibung dann der zu geringe Wert $R(0) = \frac{2}{3} \mu b$ (s. Anhang II). In der zweiten Näherung war $u(z)$ für $0 < z < 1$ eine Gerade mit der Steigung b_1 , die an der Stelle $z=1$ an die Gerade mit der Steigung $b = \frac{u_w}{D \cdot 2\nu}$ stetig angeschlossen wurde. Aus der Bedingung $R(0) = \mu b$ bestimmten Kundt und Warburg $u(0)/b$ sowie b_1/b (s. Anhang II). Es handelte sich also um eine punktweise Anpassung an den gewünschten Wert $R = \mu b$. An der Stelle $z=1$ fanden sie $R(1) = 1,036 \mu b$. Eine weitere Verbesserung gelang damit, daß an die Stelle der einen drei stetig verbundene Geraden in den Intervallen $(0, \frac{1}{3})$, $(\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$, $(\frac{2}{3}, 1)$ traten. Sie wurden durch die Bedingungen $R(0) = R(\frac{1}{3}) = R(\frac{2}{3}) = \mu b$ festgelegt. Daraus folgte $R(1) = 1,007 \mu b$, was der von Kundt und Warburg angestrebten Genauigkeit genügte. Der in die empirisch überprüfbare Formel (4.1.11) eingehende Wert des Gleitungskoeffizienten errechnete sich nun zu $\gamma = 0,7122 l$. Mit der Beziehung $l = l_0 \cdot 760/p$ (vgl. 2.1.1), wobei l_0 den Wert von l für den Druck $p = 760$ mm Hg bezeichnet, wird die Druckabhängigkeit der Gleitung erkennbar:

$$\gamma = 0,7122 l_0 \cdot 760/p \quad (4.1.19)$$

Der numerische Faktor hängt von der speziellen Hypothese über die Wirkung der Gefäßwand ab. Allgemein bleibt aber die Aussage bestehen, daß der Gleitungskoeffizient proportional zur mittleren freien Weglänge ist. Nach (4.1.11) muß die Reibung daher trotz der Konstanz des Reibungskoeffizienten mit der Dichte abnehmen, was wegen des kleinen Wertes von l_0 aber erst bei geringen Drücken gemessen werden kann. Sinkt die Dichte so weit, daß $D < 14 l$, verliert die Formel (4.1.11) ihre Gültigkeit. Bis zu dieser Grenze existieren beiderseits der Schicht in der Mitte des Gefäßes Bereiche der Länge $6 l$ mit linearem Geschwindigkeitsverlauf. Daher

hat die Reibung dort den Wert μb und wegen ihrer Konstanz gilt das auch für alle anderen Schichten.

Kundt und Warburg stellten sich hier die Frage nach den Gesetzmäßigkeiten unterhalb dieser Grenzdichte. Bei weiterer Verdünnung ist die Situation zunächst kompliziert. Sie vereinfacht sich wieder, wenn l ein Vielfaches des Gefäßdurchmessers wird. Ein großer Teil der Moleküle gelangt dann ungehindert von der einen Wand zur anderen. Um ihre Anzahl pro Zeit- und Flächeneinheit zu bestimmen, gingen Kundt und Warburg ähnlich vor wie Maxwell bei der Druckberechnung (s.S.38-39). In dem durch $mvdz/l$ dividierten Ausdruck (2.1.4) ist für z nur die konstante Entfernung der beiden Wände $D < nl$ einzusetzen und von dem Mindestabstand D bis Unendlich zu integrieren:

$$Nv \int_{D/l}^{\infty} e^{-n} \frac{n^2 l^2 - D^2}{4n^2 l^2} dn = \frac{1}{2} Nv \left(e^{-D/l} (1 - D/l) + (D^2/l^2) \int_{D/l}^{\infty} \frac{e^{-n}}{n} dn \right) = \frac{1}{2} Nv \tau \quad (4.1.20)$$

Das Symbol τ wird lediglich zur Abkürzung der geschweiften Klammer verwendet. Die Zahl der Teilchen, die pro Zeit- und Flächeneinheit von einer Wand ausgehen, ist $\frac{1}{2} Nv$. Man erkennt dies unmittelbar, wenn in (4.1.20) $D=0$ gesetzt wird. Da die Summe der Teilchen konstant bleibt, kommt die Differenz $\frac{1}{2} Nv(1-\tau)$ aus dem Innern des Gases. Die direkt von Wand zu Wand laufenden Teilchen ergeben eine zur Dichte proportionale Reibung $R_1 = \frac{1}{2} \int v_{uw} \tau$. Das soll mit dem Wert bei Normalbedingungen $R = \frac{2}{3} \int v_l \cdot v_{uw} / D$ verglichen werden. Aus $l/l_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\alpha}$ und $l = \alpha D$, wobei α eine dimensionslose Zahl ist, folgt $R_1/R = \frac{3}{4} \tau/\alpha$. Kundt und Warburg berechneten das Beispiel $\alpha=10$. Für $D = 1$ mm und $l_0 = 0,000083$ mm entspricht das einem Druck von 0,006 mm Hg. In diesem Fall stammen nur noch $(1-\tau)/\tau = 20\%$ der die Wand erreichenden Teilchen aus dem Innern des Gases. Daher rührt der überwiegende Teil der Reibung von R_1 her. Das Ergebnis

$R_1/R = 1/16$ zeigt, daß für so geringe Drücke eine sehr starke Abnahme der Reibung zu erwarten ist. Aufgrund von experimentellen Schwierigkeiten gelang es Kundt und Warburg jedoch nicht, dies auch quantitativ zu bestätigen.

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Reibung ist durch die Arbeiten von Meyer und Maxwell im Prinzip vorgegeben. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, wurden auf einer Achse drei bewegliche Scheiben befestigt, die jeweils zwischen zwei festen Scheiben Schwingungen ausführten. Das Zusammendrücken der drei Scheiben ermöglichte die Reduktion der Störeffekte (s.S.65). Kundt und Warburg hielten diese unter 1%, indem sie eine schwingende Scheibe von geringem Gewicht und zwei besonders dünne Aufhängungsdrähte verwendeten. Sie begnügten sich demnach mit einer oszillierenden und zwei festen Scheiben. Es gelang ihnen also, das Meßverfahren weiter zu verbessern. Ein Problem verzögerte die Untersuchung um Monate.¹⁴ Die Kautschukschläuche, welche die verschiedenen Teile der Apparatur verbanden, erwiesen sich bei den kleinen Drücken als undicht. Starre Verbindungen, etwa mit normalen Glasröhren, kamen nicht in Frage, weil sie die von der Pumpe verursachten Erschütterungen nicht hätten absorbieren können und deshalb zerbrochen wären. Kundt und Warburg entwickelten für diesen Zweck eine zweifach u-förmig gebogene Glasröhre, die sie wegen ihrer elastischen Eigenschaften "Glasfeder" nannten.¹⁵

Die Versuche wurden mit Luft, CO_2 und H_2 durchgeführt. Von 750 bis zu 20 mm Hg blieben die zur Reibung proportionalen logarithmischen Dekremente Λ der Scheibenschwingungen konstant. Der daraus bestimmte Wert des Reibungskoeffizienten der Luft lag mit $\mu = 0,000189 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bei 15°C zwischen denen von Meyer ($0,000182$)¹⁶ und Maxwell ($0,000198$, s.S.75). Bezeichnet Λ , das

logarithmische Dekrement für Drücke größer als 20 mm Hg, so ist nach (4.1.11) und (4.1.19):

$$\Lambda = \Lambda_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\gamma}{D}} = \Lambda_0 \cdot \left(1 + \frac{1,4 \cdot \Lambda_0 \cdot 760}{D \rho}\right)^{-1} \quad (4.1.21)$$

In mehreren Meßreihen bestätigten Kundt und Warburg diese Abhängigkeiten von p (bis zu 1 mm Hg), D und dem Wert von Λ_0 , der für jedes der drei Gase verschieden ist. Das stellte einen erneuten Nachweis für die Konstanz des Reibungskoeffizienten dar. Sie bemerkten allerdings auch selbstkritisch, daß Λ nicht sehr empfindlich gegen Veränderungen der drei Größen war. Statt des Proportionalitätsfaktors aus (4.1.19) ergab sich ungefähr die Zahl 2. Das bedeutet, die Moleküle nehmen beim Stoß gegen die Wand nicht völlig deren Translationsgeschwindigkeit an. Im Fall einer Verdünnung der Gase, für die $D < 14$ l gilt, glückte es Kundt und Warburg nicht, den sich allmählich ablösenden Wasserdampf aus der Apparatur zu entfernen. Ein quantitativer Vergleich mit der Theorie war ihnen daher nicht möglich. Sie geringsten Drücke lagen unter 0,04 mm Hg. Die Gasreibung der Luft ging dann bis auf $3/8$, die des Wasserstoffs bis auf $1/3$ des Normalwertes zurück. Bemerkenswert fanden sie, daß in diesen von ihnen bereits als Vakua bezeichneten Räumen in Übereinstimmung mit der Gastheorie noch relativ "große Quanta von Bewegungsgröße ... transportiert werden können."¹⁷

4.2 Die Untersuchung von Kundt und Warburg

Teil 2: Die Wärmeleitung

Während Kundt und Warburg in ihrer Behandlung der Gasreibung auf ein Fundament theoretischer Überlegungen und experimenteller Arbeiten zurückgreifen konnten, mußten sie bei der Wärmeleitung von einem vergleichsweise niedrigen Kenntnisstand ausgehen. Für die Messung der Reibung hatten bereits zur Zeit von Maxwells erster Veröffentlichung die nur geringfügig zu modifizierenden Methoden aus der Hydrodynamik zur Verfügung gestanden. Demgegenüber war die Bestimmung der Wärmeleitung aufgrund der konkurrierenden Phänomene der Strömung und Strahlung prinzipiell schwieriger. Auch für die Theorie, die beide Transportvorgänge unter dem einheitlichen Gesichtspunkt der mikroskopischen Diffusion von Impuls bzw. Energie beschrieb, stellte die Berechnung der Wärmeleitung ein größeres Problem dar. Das lag an der Beteiligung der inneren Freiheitsgrade an dem Energietransport.

Die Abhandlung, in der Maxwell wegen der vermeintlich linearen Temperaturabhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom Konzept der mittleren freien Weglänge zu einem Potential mit einer umgekehrten Proportionalität zur fünften Potenz des Abstands übergegangen war (s.S.73-74), beinhaltete auch einen neuen Ausdruck für die Wärmeleitfähigkeit:¹

$$\alpha = \frac{5}{3(\frac{c_p}{c_v} - 1)} \frac{p}{\rho T} \nu \quad (4.2.1)$$

Wegen der aus der allgemeinen Gasgleichung folgenden Konstanz des Ausdrucks $p/\rho T$ sind die beiden Transportkoeffizienten proportional. Die Aussagen über die Reibung, wie die Unabhängigkeit von der Dichte und der lineare Zuwachs mit der Temperatur, übertragen sich so direkt auf die Wärmeleitung.

Nach der qualitativen Untersuchung von Magnus (s.S.83) und Relativmessungen von F.Narr² gelang J.Stefan 1872 die erste experimentelle Ermittlung eines absoluten Wertes.³ Dazu konstruierte er eine von ihm als Diathermometer bezeichnete Apparatur, die aus zwei ineinander gesetzten dicht abgeschlossenen, zylindrischen Metallgefäßen bestand. Dazwischen befand sich das Gas, dessen Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden sollte. Später untersuchte Stefan damit auch die entsprechenden Eigenschaften von Textilien.⁴ Er meinte bei dem geringen Abstand der Gefäßwände, den er mit verschiedenen Zylindern von 2 bis 5 mm variieren konnte, die Entstehung von Gasströmungen weitgehend zu unterdrücken. Für die Vernachlässigung der Strahlung gab er jedoch keine Begründung. Die gesamte Anordnung kühlte er auf 0°C ab, indem er sie in ein mit Schnee gefülltes Gefäß brachte. Zwischen den beiden Metallwänden kam es dann zur Ausbildung eines Wärmestroms, der im "Zeitelement" dt die Wärmemenge dQ transportierte: $dQ = \alpha F \theta dt / \Delta$, wobei F das arithmetische Mittel der Oberflächen, θ die Temperaturdifferenz der Metallwände und Δ deren Abstand war. Ohne Berücksichtigung der Wärmemenge der im inneren Gefäß eingeschlossenen Luft läßt sich dies auch noch als $-M_z c d\theta$ schreiben, wenn $-d\theta$ die während dt erfolgte Temperaturabnahme, c die spezifische Wärme und M_z die Masse des inneren Zylinders bezeichnet. Die Differentialgleichung

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = - \frac{\alpha F}{M_z c \Delta} \theta(t) \quad (4.2.2)$$

hat die Lösung $\theta(t) = \theta_0 e^{-\Gamma t}$ mit $\Gamma = \frac{\alpha F}{M_z c \Delta}$. Aus der Messung zweier Temperaturdifferenzen θ kann Γ und somit der Wärmeleitungskoeffizient berechnet werden. Die Temperatur des äußeren Zylinders betrug konstant 0°C. Die des inneren war die gleiche, wie die der darin eingeschlossenen Luft, die selbst als Thermometersubstanz diente. Angesichts der geringen Wärmekapazität der Gase vermied

Stefan auf diese Weise Störungen durch ein zusätzliches Thermometer. Die Temperatur ergab sich aus der Ablesung eines Manometers. Der so gewonnene Wärmeleitungskoeffizient der Luft stimmte genau mit dem Ergebnis der Maxwell'schen Formel (4.2.1) überein. Stefan bewertete dies als einen bedeutenden Erfolg für die Theorie (vgl. sein Zitat S.2). Später räumte er allerdings ein, erst aufgrund des Resultats, also rückwirkend, von einem vernachlässigbar kleinen Beitrag der Strahlung ausgegangen zu sein.⁵ Insoweit handelte es sich eher um eine Bestätigung des Experiments durch die Theorie. Die beiden unter Normalbedingungen und einem Druck von 428 mm Hg angestellten Messungen lieferten die gleichen Werte. Damit glaubte Stefan, die Unabhängigkeit der Wärmeleitung von der Dichte bereits auf das "schlagendste" bewiesen zu haben.⁶ Die Ideen der kinetischen Gastheorie besaßen für einige Physiker offenbar eine solche Anziehungskraft, daß die Bereitschaft zur Akzeptanz günstiger Ergebnisse sehr groß war.

Kurz darauf fand Boltzmann jedoch einen Fehler in der Maxwell'schen Rechnung. In (4.2.1) mußte an die Stelle von $5/3$ der Faktor $5/2$ treten.⁷ Mit der aus (1.2.4) und (1.2.6) folgenden Beziehung $c_p - c_v = \frac{p}{\rho T}$ gab er der Formel für den Wärmeleitungskoeffizienten die Gestalt:

$$\kappa = \frac{5}{2} c_v \mu \quad (4.2.3)$$

In diese Form hätte auch schon Maxwells frühere Relation (2.1.13) gebracht werden können. Aus $\kappa = \frac{3}{4} \beta l v p / T$ folgt mit $p = \frac{1}{3} \rho v^2$ (1.2.1) und $\frac{3}{2} \beta v^2 = c_v T$ (1.2.4): $\kappa = 1,5 c_v \mu$. Die gerade gefundene Übereinstimmung von Theorie und Experiment war hinfällig geworden. Boltzmann lastete dies der Theorie an, denn quantitative Aussagen erschienen ihm unmöglich ohne genaue Kenntnisse der intramolekularen Bewegungen.⁸ Er bezweifelte auch, daß sich deren Energie mit der gleichen Geschwindigkeit fortpflanzte wie die Energie der

Translationsbewegung. Maxwell hatte das in seiner Rechnung stillschweigend vorausgesetzt.⁹

Kundt und Warburg teilten die Einschätzung über die Unsicherheit der Theorie. Deshalb sahen sie davon ab, für die Wärmeleitung ähnliche Berechnungen durchzuführen wie bei der Behandlung der Reibung. Außerdem gelang es ihnen nicht, den zur Gleitung analogen Effekt, den Temperatursprung an den Gefäßwänden nachzuweisen. So kam es zu einer überwiegend qualitativen Untersuchung der Wärmeleitung. Die Experimentiervorrichtung bestand aus einer kugel- bzw. zylinderförmigen Hülle, in der sich ein Thermometer befand. Die Verbindung mit einer Luftpumpe erlaubte die Veränderung des Drucks. Sie tauchten die Apparatur nacheinander in kochendes Wasser und schmelzendes Eis. Die Abkühlungsgeschwindigkeit war dann ein Maß für den Wärmeverlust. Beobachtet wurde die Zeit, die das Thermometer für die Abkühlung von 60°C auf 20°C benötigte. Als Funktion des von 760 mm Hg bis unter 1 mm Hg abnehmenden Drucks zeigte sie einen charakteristischen Verlauf. Ihr ansonsten kontinuierlicher Anstieg wurde in einem mittleren Druckbereich unterbrochen, wo sie innerhalb eines Intervalls, dessen Grenzen von der speziellen Geometrie des Apparates abhingen, konstant blieb. Dieses Verhalten war zwar nicht völlig neu¹⁰, erfuhr durch Kundt und Warburg aber jetzt eine Interpretation im Sinn der kinetischen Gastheorie. Demzufolge verminderte sich der Anteil der Strömungen an dem Wärmetransport bei Verringerung der Dichte und verschwand schließlich unterhalb eines Schwellenwertes. Wegen der Konstanz der Strahlung wie auch der Leitung verlängerte sich die Abkühlungszeit zunächst nicht mehr. Erst bei sehr kleinen Dichten nahm der Beitrag der Leitung offenbar ab, ganz entsprechend wie im Fall der Reibung (s.S.109-110). Es gelang also, die Entstehung von Strömungen durch ein Absenken des Drucks zu verhindern. In Stefans

Versuch hatte die räumliche Dimensionierung dies von vornherein bewirken sollen. Das oben erwähnte Plateau der Abkühlungszeiten in den Experimenten von Kundt und Warburg zeigte außerdem die Druck-unabhängigkeit des Wärmeleitungskoeffizienten. Mit einer unteren Grenze von 1 mm Hg bei Luft und CO₂ sowie 9 mm Hg bei H₂ war dieser Nachweis wesentlich umfassender als der von Stefan. Kundt und Warburg erkannten, daß dieses Ergebnis Konsequenzen für das 1817 von Dulong und Petit aufgestellte Abkühlungsgesetz haben mußte. Es lieferte für die Geschwindigkeit der allein durch die Strahlung eintretenden Abkühlung v_0 eines Körpers der Temperatur $\theta + T$ in einer Hülle mit der Temperatur θ :¹¹

$$v_0 = w a^0 (a^1 - 1) \quad (4.2.4)$$

Die Konstante w berücksichtigte die Oberflächenbeschaffenheit des Körpers und der Hülle sowie deren Abstand, ferner galt $a=1,0077$. Dulong und Petit hatten ihre Experimente bei ungefähr 2 mm Hg durchgeführt und damit geglaubt, den Einfluß der Luft oder den eines anderen Gases weitgehend auszuschließen (vgl. die ähnlichen Überlegungen bei der Reibung S.65). Ein Wärmetransport wäre dann nur durch Strahlung möglich gewesen. Tatsächlich aber trug die Leitung nicht unbeträchtlich dazu bei. Wie Kundt und Warburg für $T=100^\circ\text{C}$ und $\theta=0^\circ\text{C}$ nachträglich berechneten, belief sich ihr Anteil in den beiden Versuchsreihen von Dulong und Petit auf 15% bzw. 30%.¹² Sie kommentierten es zurückhaltend: "Hiernach kann man die Dulong-Petit'schen Versuche nicht als scharf beweisend für das auf sie gegründete Gesetz ansehen".¹³ Es war trotz einzelner Zweifel bis dahin allgemein akzeptiert worden.¹⁴ Die Veröffentlichung von Kundt und Warburg enthielt die Ankündigung, daß sie die nun offene Frage der Temperaturabhängigkeit der Wärmestrahlung selbst klären wollten.¹⁵ Die experimentelle Methode dazu konnten sie bereits vorstellen. Es handelte sich um die Realisierung von

Drücken unter 10^{-2} mm Hg, wobei die Abkühlungszeiten als Indiz für die Güte dieser Vakua dienten. Das erlaubte die Isolierung der Wärmestrahlung von den anderen Übertragungsmechanismen und somit quantitative Messungen. Daraus ergaben sich wiederum die Wärmeleitungskoeffizienten. Die Unsicherheit über die spezifische Wärme des Thermometers verhinderte hier jedoch ein zuverlässiges Ergebnis. Das betraf nicht die relativen Werte, die deshalb zu einem Vergleich mit der Theorie herangezogen werden konnten. Aus (4.2.3) und $c_p - c_v = \frac{p}{\rho T}$ folgte das Verhältnis der Wärmeleitungskoeffizienten in der Größe $k = c_p / c_v$:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{k_1 - 1}{k_2 - 1} \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (4.2.5)$$

Auf die Luft bezogen errechnete sich für H_2 7,0 und für CO_2 0,70. Die Experimente erbrachten 7,1 bzw. 0,59. Die Abweichung des letzten Wertes begründeten Kundt und Warburg mit der Temperaturabhängigkeit von c_p / c_v bei CO_2 .

Vermutlich hing es auch mit diesen Fragen zusammen, daß die beiden Autoren unmittelbar anschließend das Verhältnis der spezifischen Wärmen der Thermometersubstanz Quecksilber bestimmten.¹⁶ Dabei verwendete Kundt seine Methode der Staubfiguren erstmals zu einer exakten Messung der Größe c_p / c_v . Die geplante Untersuchung über die Wärmestrahlung, ursprünglich ihr Ausgangspunkt für die Beschäftigung mit der kinetischen Gastheorie, kam nicht mehr zustande. Stefan griff das Thema 1879 auf.¹⁷ Er führte keine neuen Experimente durch, sondern benützte die Meßergebnisse von Dulong und Petit, an denen er Korrekturen vornahm. Den Einfluß der Leitung berücksichtigte er mit dem von ihm selbst gefundenen Wärmeleitungskoeffizienten. Die dann nur noch der Strahlung zugeschriebenen Werte ließen sich innerhalb gewisser Fehlergrenzen als Funktion der vierten Potenz der absoluten Temperatur darstellen.

Eine erste Überprüfung wurde 1880 in Straßburg von Kundts Assistenten Leo Graetz vorgenommen.¹⁸ Er setzte dazu die oben erläuterte Methode von Kundt und Warburg ein. Boltzmann gelang es 1884 mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes, die empirisch gefundene Beziehung theoretisch zu begründen.¹⁹

4.3 Kundt und Warburgs folgende Arbeiten zur kinetischen Gastheorie und ihr weiterer Weg bis zu den Berufungen nach Berlin

Die Berechnung der spezifischen Wärme stellte die kinetische Gastheorie vor ernste Probleme. Aus der von Clausius angegebenen Formel (1.2.7) für das Verhältnis der Energie der Translationsbewegung K zu der Gesamtenergie H eines Moleküls $K/H = \frac{3}{2} (k-1)$ ergab sich mit der von Boltzmann gefundenen Beziehung $H = nK$ bei einem aus n punktförmigen Atomen bestehenden Molekül:¹

$$k = (2+3n)/3n \quad (4.3.1)$$

Es war bis 1875 noch in keinem Fall gelungen, Übereinstimmung zwischen der Formel (4.3.1) und den experimentell gewonnenen Resultaten zu erzielen. Maxwell hatte in seiner Arbeit von 1860 für Teilchen mit nichtsphärischer Gestalt $n=2$ (2.1.14) erhalten. Das lieferte $k = 1,33$ statt des bekannten Wertes für die Luft $k = 1,41$. Er wollte deshalb anfangs die gesamte Theorie verwerfen. Aufgrund der Erfolge bei den Transportvorgängen rückte er etwas später von dieser extremen Position ab (s.S.43). Der Widerspruch war jedoch geblieben. Eine Erklärung mußte außerhalb des Rahmens von (4.3.1) liegen, denn mit wachsendem n wird k kleiner, und die Diskrepanz zwischen Experiment und Theorie wächst sogar. Im Jahr 1875 bezeichnete Maxwell dies als die größte Schwierigkeit der gesamten Molekulartheorie.²

Kundt und Warburg waren zu jener Zeit durch mehrere Umstände besonders motiviert, die spezifische Wärme des Quecksilbers zu untersuchen.³ Ihre im letzten Abschnitt behandelte Arbeit hatte sicherlich das Vertrauen in die Grundlagen der kinetischen Gastheorie gesteigert. Der Leitungsvorgang lenkte die Aufmerksamkeit wieder auf die spezifische Wärme, zu deren Bestimmung Kundt mit seinen Staubfiguren über eine neue Methode verfügte. Außerdem

hörten sie von A.Baeyer, dem Kollegen aus der Chemie, daß es Anzeichen für die Einatomigkeit des Quecksilbergases gab.⁴ Nach (4.3.1) wäre dann $k=5/3$ zu erwarten.

Zur Ausführung des Experiments benützten Kundt und Warburg das in Abschnitt 3.2 (S.91) beschriebene Doppelrohr. Den mit Quecksilber gefüllten Teil der Apparatur brachten sie in einen Heizkasten, der mit 50 Bunsenbrennern gleichmäßig auf Temperaturen zwischen 300°C und 350°C erwärmt wurde. Durch Vergleichsmessungen überzeugten sie sich davon, daß die verschiedenen Sättigungsgrade des Quecksilberdampfes das Ergebnis nicht wesentlich beeinflussten. Gemäß (3.2.1) ergab sich dann, wenn L die aus den Staubfiguren abzulesende Wellenlänge ist:

$$k_{Hg}/k_{Luft} = (L_{Hg}/L_{Luft})^2 (T_{Luft}/T_{Hg}) (\rho_{Hg}/\rho_{Luft}) \quad (4.3.2)$$

Mit Röntgens Wert $k_{Luft}=1,405$ (s.S.93) erhielten sie auch tatsächlich $k_{Hg}=1,666$. Die zwar nach wie vor fehlende Erklärung für die spezifischen Wärmen der meisten anderen Gase hatte nach Ansicht von Kundt und Warburg nun eine andere Qualität. Es handelte sich dabei nicht um einen Mangel in den grundlegenden Prinzipien der Theorie, sondern um die offenbar unrichtige Art ihrer Anwendung auf mehratomige Moleküle. Die Bestätigung von (4.3.1) im Fall des Quecksilbers konnte kaum ein Zufall sein.

Kundt und Warburg sahen hierin einen Beweis dafür, "daß das Molekül des Quecksilbergases in Bezug auf seine mechanischen und thermischen Eigenschaften sich merklich wie ein materieller Punkt verhält."⁵ Die Existenz der Moleküle betrachteten sie als eine Realität, auch wenn es Phänomene gab, wie das von ihnen erwähnte Emissionsspektrum des Quecksilbers, wo sich in den zahlreichen Linien weitaus komplexere Strukturen manifestierten.⁶ Bei den Wärmeerscheinungen spielten sie allerdings keine Rolle. In den

unterschiedlichen Situationen kamen also ganz andere Merkmale der kleinsten Teilchen zum Vorschein.

Mit dieser Untersuchung endete die Zusammenarbeit von Kundt und Warburg, da der letztere zum Sommersemester 1876 den Freiburger Physiklehrstuhl übernahm. Der dortige Amtsinhaber Johann Müller, bekannt durch seine Bearbeitungen des Lehrbuchs von Pouillet, war nach 31jähriger Tätigkeit am 3.10.1875 verstorben. Vergeblich versuchte man, Boltzmann als Nachfolger zu gewinnen. Die Verhandlungen zerschlugen sich Ende November 1875.⁷ Boltzmann wird wenig Neigung verspürt haben, Wien mit Freiburg zu vertauschen, dessen Lehrstätte damals noch den Ruf einer "stillen katholischen Winkeluniversität" besaß.⁸ Am 7.12.1875 benannte die philosophische Fakultät zwei neue Kandidaten, die sie aufgrund vorliegender Gutachten von Kirchhoff (Berlin), Hankel, C.G. Neumann, Zöllner (alle Leipzig) und Jolly (München) als gleichwertig einstufte.⁹ Es waren der Göttinger Extraordinarius und Mitarbeiter W. Webers Eduard Riecke sowie Emil Warburg. Von Riecke wurde durch private Mitteilungen bekannt, daß er Göttingen nicht verlassen wollte.¹⁰ Daher machte man nur Warburg ein Angebot. Innerhalb von zwei Wochen kam es zu einer Übereinkunft. Über den Gehaltsvorschlag, 3500 Mark statt 3000 Mark pro Jahr in Straßburg¹¹, gab es keine Diskussion. Unzureichend fand Warburg dagegen die finanziellen Zuwendungen für die ihm notwendig erscheinenden Ergänzungen der Laboratoriumsausstattung. In diesem Punkt konnte er seine Wünsche nicht vollständig durchsetzen.¹² Am 5. Januar 1876 erfolgte Warburgs Ernennung.¹³

Zu seinen ersten Anschaffungen gehörten eine Quecksilberluftpumpe und ein Radiometer.¹⁴ Das stand offenbar im Zusammenhang mit der kinetischen Gastheorie. Die einzige Veröffentlichung des ersten Freiburger Jahres stellte eine Fortsetzung der bisherigen Arbeit

dar und behandelte die Gleitung der Gase auf Glas.¹⁵ Die Messungen hatte Warburg noch in Straßburg vorgenommen.¹⁶ Es ging ihm um eine weitere unabhängige Bestimmung des Gleitungskoeffizienten. Hierzu verwendete er die auch von Meyer erprobte Transpirationsmethode (s.S.71). Beobachtet wurde also die Zeit, die eine Gasmenge für das Durchströmen eines Druckgefälles in einem Kapillarrohr benötigte. Die Gleichungen zur Berechnung der laut (4.1.19) druckabhängigen Gleitung konnte Warburg nicht exakt lösen. Er benützte deshalb eine Näherung, in der das Ausflußvolumen mit einem auf den

Druck $p = \frac{p_1}{1 + \frac{p_1 - p_2}{p_1}}$ bezogenen ν wie in (2.3.14) proportional zu

$(1 + 4 \nu / R) / \mu$ war. Dabei bezeichnen p_1 und p_2 die Drücke an den Röhrenenden. In diesem Versuch machte sich die Gleitung schon unter höheren Drücken bemerkbar, weil die Röhrenradien mit 0,15 mm und 0,1 mm nur etwa 1/10 des Abstands der schwingenden Scheiben betrugen. Die Verringerung von einer Atmosphäre auf 38 mm Hg ließ die Reibung um 5% abnehmen. Der daraus folgende Gleitungskoeffizient der Luft lag für 38 mm Hg im Intervall von 0,0016 mm bis 0,0018 mm und damit unter dem des Schwingungsversuchs, der 0,0020 mm bis 0,0022 mm ergeben hatte. Für den von der Oberflächenbeschaffenheit abhängigen Gleitungskoeffizienten lieferte die Formel (4.1.19) die untere Schranke 0,0012 mm. Warburg betrachtete dies als ein zufriedenstellendes Resultat, zumal das Verhältnis der Werte für Wasserstoff und Luft theoriegemäß dem der mittleren freien Weglängen entsprach.

In den kommenden Jahren wandte sich Warburgs Interesse mehr den elektrischen und magnetischen Erscheinungen zu. In der Lehre erweiterte er das Vorlesungsangebot. Während sein Vorgänger physikalisch-theoretische Themen noch den Mathematikern überlassen hatte, hielt er spezielle Veranstaltungen darüber ab, die er von 1880 an

offiziell als "Ausgewählte Kapitel aus der mathematischen Physik" ankündigte.¹⁷ Anfangs vertrat Warburg die Lehre der Physik ganz allein. Erst 1880 kam ein Privatdozent hinzu, 1883 ein zweiter. Die Studentenzahlen stiegen in diesen Jahren deutlich an. Immer häufiger traten räumliche Probleme auf. Schließlich begann man 1888 mit dem Bau eines neuen Instituts, das 1890 fertiggestellt wurde. Nach beinahe 20 Jahren in Freiburg erhielt Warburg 1895 einen Ruf nach Berlin.

Kundts folgende Arbeiten zur kinetischen Gastheorie galten weniger der Erweiterung, als vielmehr der Vermittlung des bisherigen Kenntnisstandes. Dafür entwickelt er Experimente, die einem größeren Publikum wirkungsvoll vorgeführt werden konnten. Die Reibung in stark verdünnten Gasen demonstrierte er qualitativ an einer noch durch Spuren gasiger Materie übertragenen Bewegung.¹⁸ Hierzu verwendete er eine horizontal gelagerte Scheibe, die in der Lage war, um eine durch ihren Mittelpunkt gehende vertikale Achse zu rotieren. Daran befestigte er ein Radiometerkreuz. So ließ sie sich in einem weitgehend evakuierten Gefäß durch Strahlung antreiben. Ohne eine mechanische Verbindung hing Kundt in geringem Abstand parallel darüber eine zweite Scheibe auf, die ebenfalls horizontal drehbar war. Mit etwas Verzögerung begann sie im gleichen Sinn zu rotieren wie die erste. In einer kleinen Veröffentlichung, die 1877 erschien, beschrieb Kundt einen Apparat, der das verschiedene Wärmeleitungsvermögen der Gase sichtbar machte.¹⁹ Um drei mit Äther gefüllte Glasröhren wurde jeweils ein weiteres schmales Glasrohr geschmolzen, das H_2 , Luft oder CO_2 enthielt. Der enge Raum verhinderte die Entstehung von Strömungen. Tauchte man alle Röhren gleichzeitig in kochendes Wasser, so war die Temperatur und daher auch die Entflammbarkeit des Äthers eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gases. Zuerst ließ

sich die Röhre mit H_2 , etwas später die mit Luft und zuletzt die mit CO_2 entzünden. Im April 1876 hielt Kundt in der Berliner Singakademie vor einem illustren Zuschauerkreis - nicht nur Wissenschaftler wie Helmholtz, sondern auch der Kronprinz und seine Frau waren anwesend - einen Experimentalvortrag über die kinetische Gasttheorie.²⁰

Kundts Tätigkeitsfeld verlagerte sich in den nächsten Jahren auf optische und elektromagnetische Untersuchungen. Das Motto seiner Arbeit formulierte er in den Worten: "Das letzte Ziel aller Naturwissenschaft ist, die Naturerscheinungen auf einfach vorstellbare und leicht begreifliche mechanische Vorgänge zurückzuführen".²¹ Im Mai 1885 lehnte er einen Ruf nach München ab.²² Dagegen akzeptierte er 1888 ein Angebot, das zweifellos von anderer Qualität war. Helmholtz wechselte als Präsident zur neugegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt und schlug Kundt für die Nachfolge an der Berliner Universität vor. Helmholtz und v. Bezold betonten in einem gemeinsamen Gutachten Kundts experimentelles Geschick, seine Originalität sowie die Fähigkeit, auch "die leitenden Ideen der modernen mathematischen Physik" richtig zu beurteilen.²³ Die Qualifikation des an zweiter Stelle genannten Friedrich Kohlrausch schätzten sie fast ebenso hoch ein, aber verglichen mit Kundt sei er "vielleicht weniger überraschend in der Auffindung neuer Gesichtspunkte."²⁴ An die dritte Stelle setzten sie Ludwig Boltzmann, "nicht als ob derselbe von geringerer wissenschaftlicher Bedeutung wäre, als die beiden anderen, sondern weil seine Grundtätigkeit mehr nach der mathematischen Seite der theoretischen Physik hin gelegen hat."²⁵ Sie verbanden das gleich mit dem Wunsch, Boltzmann auf die Stelle des gerade verstorbenen G.Kirchhoff zu berufen, falls Kundt oder Kohlrausch annehmen sollten.²⁶ Nach erfolgreichen Verhandlungen zog Boltzmann seine

bereits gegebene Zusage am 24.6.1888 überraschend wieder zurück.²⁷ Kundt kam am 1.7.1888 nach Berlin²⁸ und war an dem neuen Beschluß über die Besetzung dieser Position beteiligt. Die Fakultät schlug H.Hertz und M.Planck vor.²⁹ Da sich H.Hertz für Bonn entschied, erhielt Planck die Berliner Professur, wobei man ihm anfangs nur ein Extraordinariat zugestand. In ihrem Gutachten lobte die Fakultät, "daß er vorzugsweise die strengen Konsequenzen der Thermodynamik ohne Einmischung anderer Hypothesen oder unter sorgfältiger Scheidung des Sicherem und des Zweifelhafte durchzuführen sucht".³⁰ Hier deutete sich die Attraktivität des Gedankens an, die Hauptsätze der Wärmelehre ohne weitere Hypothesen als grundlegendes Konzept der Physik anzusehen.

Kundt verblieben in Berlin knapp sechs Jahre, bis er am 21.5.1894 im Alter von 54 Jahren starb. Die Lösung der Nachfolgefrage erwies sich als schwierig. In einer Fakultätssitzung am 9.6.1894 erklärte Helmholtz, daß nur Kohlrausch als gleichwertiger Ersatz für Kundt in Betracht käme.³¹ Eine Liste wurde deshalb gar nicht erstellt. Kohlrausch erschien die Arbeitsbelastung des Berliner Ordinariats jedoch zu hoch. Er schlug deshalb eine Teilung der Stelle vor.³² Als sich dies nicht realisieren ließ, lehnte er den Ruf ab.³³ Daraufhin entschied man sich für Emil Warburg, ein Beschluß der auch antisemitische Ressentiments erweckte.³⁴ Die Fakultät würdigte seine Vielseitigkeit und charakterisierte seinen Arbeitsstil durch "das innige, heutzutage nicht eben häufige Zusammenwirken experimenteller Geschicklichkeit und besonnenen theoretischen Durchblicks."³⁵ Wegen einer entsprechenden Anweisung des Ministeriums mußte diesmal eine Liste mit drei Namen vorgelegt werden. Aber "von den übrigen Physikern, welche gegenwärtig an der Spitze eines Instituts stehen, hat die Fakultät keinen Einzigen namhaft zu machen gewußt, für dessen volle Bewährung als Nachfolger von Kundt

und Helmholtz und Magnus sie die Verantwortung auf sich nehmen zu können glaubt".³⁶ In diesem Sinn setzte man zwar O.Wiener und W.Nernst auf Platz zwei und drei, wollte ernsthaft aber nur Warburg haben, der die Berufung auch annahm.

4.4 Marian v. Smoluchowskis Untersuchung des Temperatursprungs bei der Wärmeleitung

Das Berliner Ordinariat erforderte Organisationstalent und hohe Belastbarkeit. Warburg gelang es trotz der Verpflichtungen in der Lehre, der Administration und der Akademie¹, die wissenschaftliche Produktion unvermindert fortzusetzen und auch noch eine große Zahl von Doktoranden zu betreuen. In den zehn Jahren seiner Tätigkeit als Direktor des Universitätsinstituts entstanden dort 220 publizierte Arbeiten.² Die Physik in Berlin besaß zu jener Zeit für viele Ausländer eine große Anziehungskraft. So hörte man unter den Zuhörern des von Warburg geleiteten Kolloquiums fast mehr englisch als deutsch geführte Gespräche.³

Im Sommersemester 1897 kam der gerade 25jährige M.v.Smoluchowski nach Berlin. Er hatte von 1890 bis 1894 in Wien studiert, wo er 1895 aufgrund einer experimentellen Untersuchung über die Elastizität weicher Körper mit der Bestnote "sub auspiciis Imperatoris" promoviert worden war.⁴ Anschließend verließ er Österreich, um sich einige Zeit im Ausland fortzubilden. Im Herbst 1895 ging er an das von G.Lippmann geleitete Institut in Paris.⁵ Dort beschäftigte ihn eine von Clausius thermodynamisch hergeleitete Aussage über die Wärmestrahlung. Demzufolge sollte das Emissionsvermögen eines Körpers von dem Brechungsindex des umgebenden Mediums abhängen. Es entstanden zwei Publikationen. Die eine enthielt den bis dahin noch nicht gelungenen experimentellen Nachweis, die andere eine neue Erklärung, die auf der Strahlungstheorie beruhte. Das wurde charakteristisch für seine Arbeitsweise. Ein ihn interessierendes Thema wollte er sowohl experimentell als auch theoretisch behandeln. Er entzog sich ganz bewußt der zunehmenden Spezialisierung, die eine Entscheidung für eine der beiden Richtungen

verlangte.⁶ Das Wintersemester 1896/97 verbrachte er an Kelvins Institut in Glasgow. Hier untersuchte er die elektrischen Wirkungen der Röntgen- und Uranstrahlen. Die Ergebnisse schlugen sich in mehreren Aufsätzen in "Nature" und einem im "Philosophical Magazine" nieder.⁷ Am 18.3.1897 schrieb er seinen Eltern: "Es ist, glaube ich, doch besser, wenn ich nach Berlin gehe, obwohl ich England ungern verlasse. Will ich aber einen anderen Gegenstand wählen und eine eigene Arbeit beginnen, so tue ich doch besser, in ein so ausgezeichnetes Institut wie das Berliner zu gehen."⁸ Noch im gleichen Monat korrespondierte er deshalb mit Warburg, der von ihm ein eigenes Arbeitsthema erwartete. Smoluchowski wählte "die Bestimmung der Wellenlänge der von Uran ausgehenden Strahlen" und das Problem, "ob das von einem glühenden Magneten ausgehende Licht polarisiert ist".⁹

Ende April 1897 traf er in Berlin ein und begann auf Empfehlung Warburgs mit dem zweiten. Doch schon bald gab es ein negatives Resultat. Daraufhin stellte Warburg ihm Mitte Mai die Aufgabe, den Temperatursprung bei der Wärmeleitung verdünnter Gase zu messen. Vielleicht war die mittlerweile kritischere Bewertung der kinetischen Theorie eine der Ursachen dafür, daß Warburg dieses Thema erst jetzt wieder aufgriff. Der folgende Abschnitt 4.5 wird davon handeln. Smoluchowski reizte die Problematik, weil sie sowohl eine experimentelle als auch eine mathematische Seite besaß.¹⁰ Anfang Juni bekam er eine neu angefertigte Apparatur¹¹ und führte die Untersuchung innerhalb zweier Monate durch. Er stand unter Zeitdruck, denn im August mußte er wegen der Ableistung von Militärübungen zurück nach Österreich.¹² In Berlin beschäftigte er sich ausschließlich mit der Auswertung der Experimente. Die gastheoretischen Betrachtungen sollten später folgen.¹³ So beschrieb er den Temperatursprung lediglich

makroskopisch. Er benutzte hierzu die Poissonsche Beziehung, wonach der konstante Wärmestrom proportional zum Temperaturunterschied an der Grenze zweier Substanzen "A" und "B" ist:

$$\kappa_A \frac{\partial \theta_A}{\partial n} = \kappa_B \frac{\partial \theta_B}{\partial n} = q(\theta_A - \theta_B) \quad (4.4.1)$$

Dabei bezeichnet κ den Wärmeleitungskoeffizienten, θ die Temperatur, n die Normale auf der Grenzfläche in Richtung des Stoffes "A" und q einen Proportionalitätsfaktor. Der Quotient $\kappa/q = \gamma$ ist nach der Definition (2.2.19) analog zu dem Gleitungskoeffizienten γ in der Reibung. Smoluchowski nannte ihn dementsprechend den "Temperatursprungkoeffizienten". Für seine Experimente verwendete er zwei verschieden große zylindrische Glasgefäße, in die er Luft oder Wasserstoff füllte. Mit einer angeschlossenen Luftpumpe konnte er den Druck verändern. Das in den Gasraum hineinragende luftdicht eingeschlifene Thermometer zeigte die Temperaturabnahme der in Eiswasser eingetauchten Apparatur an. Smoluchowski formulierte nun den Zusammenhang zwischen γ und der Abkühlungszeit t . Dazu machte er einige vereinfachende Annahmen. Die von ihnen verursachten Ungenauigkeiten kompensierte er durch Korrekturglieder. Wärmeleitung und Strahlung wurden als temperaturunabhängig betrachtet. Außerdem behandelte er das Thermometer und das Glasgefäß wie unendlich lange Zylinder, auf denen es keine Temperaturdifferenzen gibt. Der Wärmeverlust des Thermometers ließ sich dann durch folgende Differentialgleichung ausdrücken:

$$-M_T c \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} = (\kappa L + \sigma S) \theta(t) \quad (4.4.2)$$

M_T ist die Masse, c die spezifische Wärme des Thermometers, θ der Temperaturunterschied zwischen Thermometer und Glasgefäß¹⁴, κ der Wärmeleitungskoeffizient des Gases, σ der Strahlungskoeffizient. Die Terme κL und σS bezeichnen die Wärmemengen, die pro Zeiteinheit und 1°C Temperaturunterschied durch Leitung bzw. Strahlung

vom Thermometer zum Gefäß transportiert werden. Die Integration von (4.4.2) liefert:

$$\alpha L + \sigma S = \frac{1}{t} M_T c \log \frac{\theta(t=0)}{\theta(t)} \quad (4.4.3)$$

Für das beste Vakuum gilt $\alpha L = 0$ und die dazugehörige Abkühlungszeit wird t_s genannt:

$$\sigma S = \frac{1}{t_s} M_T c \log \frac{\theta(t=0)}{\theta(t)} \quad (4.4.4)$$

Damit ist:

$$\alpha L = \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_s} \right) M_T c \log \frac{\theta(t=0)}{\theta(t)} \quad (4.4.5)$$

Aufgrund des Leitungsvorgangs tritt durch jeden Kreiszylinder innerhalb des Glasgefäßes konzentrisch zum Thermometer pro Zeiteinheit die Wärmemenge $\alpha F_s \frac{\partial \Omega}{\partial \rho}$, wobei $\Omega(\rho, t)$ die Temperatur des Gases sowie $F_s = 2\pi Z \rho$ die Mantelfläche des Zylinders mit Radius ρ und Länge Z ist. Es ergibt sich die folgende Beziehung für L :

$$\theta(t) \alpha L = -2\pi Z \alpha \rho \frac{\partial \Omega}{\partial \rho} \quad (4.4.6)$$

Die rechte Seite darf nicht vom Radius ρ abhängen, was zur Differentialgleichung $\rho \frac{\partial \Omega}{\partial \rho} = \text{const.} = a$ führt. Sie hat die Lösung $\Omega(\rho) = a \log \rho + K$, wobei K eine Integrationskonstante ist. Die Randbedingungen am Gefäß und am Thermometer mit den Temperaturen θ_c bzw. θ_r sowie den Abständen R bzw. r von der Achse sind gemäß (4.4.1):

$$\rho \frac{\partial \Omega}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R} = \theta_c - \Omega(R) \quad (4.4.7a) \quad \rho \frac{\partial \Omega}{\partial \rho} \Big|_{\rho=r} = \Omega(r) - \theta_r \quad (4.4.7b)$$

Unter Verwendung der Lösung von Ω :

$$\rho a/R = \theta_c - a \log R - K \quad (4.4.8a)$$

$$\rho a/r = a \log r - \theta_r + K \quad (4.4.8b)$$

Die Summe der beiden Gleichungen liefert:

$$a = \frac{\theta}{\log \frac{R}{r} + \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right)} \quad (4.4.9)$$

eingesetzt in (4.4.6):

$$L = \frac{2\pi Z}{\log \frac{R}{r} + \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right)} \quad (4.4.10)$$

Bei höheren Drücken verschwindet γ und der entsprechende Wert ist:

$$L_0 = \frac{2\pi Z}{\log \frac{R}{r}} \quad (4.4.11)$$

Schließlich erhält man für den Temperatursprungkoeffizienten:

$$\gamma = \frac{\log \frac{R}{r}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r}} (L_0 / L - 1) \quad (4.4.12)$$

Damit ist die Verbindung zwischen den experimentell zu bestimmenden Abkühlungszeiten t , die eingesetzt in (4.4.5) L ergeben, und γ hergestellt. L_0 ist laut (4.4.11) durch die Dimensionen der Apparatur festgelegt. Wie man an (4.4.5) erkennt, bewirkt der Temperatursprung eine Verlängerung der Abkühlungszeiten, denn auf der linken Seite steht statt $\propto L_0$ nun die kleinere Größe $\propto L$. Die Wärmeleitung geht also scheinbar von $\propto$ auf $\propto L/L_0$ zurück. Smoluchowski fand in seinen Versuchen bei Verringerung des Drucks, er kam bis unter 10^{-2} mm Hg, tatsächlich einen deutlichen Anstieg der Abkühlungszeiten.¹⁵ Das sah er als Nachweis für die Existenz des Temperatursprungs an. Eine Verminderung von $\propto$, "für welches übrigens nach der kinetischen Gastheorie gar kein Grund vorläge"¹⁶, erschien ihm nicht plausibel. Dann mußten nämlich, argumentierte er, die Wärmeleitfähigkeiten in den beiden unterschiedlich großen Gefäßen unter gleichem Druck innerhalb der Meßgenauigkeit gleich sein. Das aber war nicht der Fall. Dagegen erwies sich das Verhältnis des Temperatursprungkoeffizienten zur

mittleren freien Weglänge in beiden Gefäßen als gleich und annähernd druckunabhängig. Dieselbe Eigenschaft besitzt der Gleitungskoeffizient (4.1.19). Allerdings unterschieden sich die Werte von γ für Luft (1,70) und Wasserstoff (6,96) erheblich. Smoluchowski vermutete die Ursache in dem Umstand, daß die leichteren Wasserstoffmoleküle beim Stoß mit der Wand weniger von ihrer Geschwindigkeit verlieren. Er bezog sich also auch bei der Wechselwirkung von Gas und festem Körper auf die elementaren Stoßgesetze der Mechanik.

Nach Wien zurückgekehrt entwickelte er in den folgenden Monaten eine Erklärung des Temperatursprungs, die sich "in einfachster Weise aus der kinetischen Gastheorie ergibt".¹⁷ Ein numerisch exaktes Ergebnis konnte nicht erwartet werden, weil der Einfluß der Gefäßwand unbekannt blieb. Deshalb genügte Smoluchowski eine semiquantitative Untersuchung, wie sie mit dem einfachen Konzept der mittleren freien Weglänge möglich war. Er betrachtete dazu ein lineares Temperaturgefälle zwischen zwei parallelen Wänden und berechnete den Wärmestrom W durch eine Isothermenfläche im Abstand x von der linken Wand. Die drei Terme, aus denen sich W zusammensetzt, haben die gleiche Form wie die bei der Reibung verwendeten. Es ist lediglich die Impulsdichte $\rho u(z)$ gegen die Wärmemenge pro Volumen $c_v \rho \theta(z)$ auszutauschen. Für den Beitrag der Schichten zwischen der linken Wand und x erhält man demzufolge [analog zu (4.1.3), wenn die Grenzen von z verändert werden]:

$$W_1 = \frac{1}{2} c_v \rho \frac{\nu}{l} \int_0^{\frac{1}{2}} \int_0^x \theta(x-z) e^{-z/l \cos \vartheta} \sin \vartheta \, dz \, d\vartheta \quad (4.4.13)$$

Entsprechend der Wärmestrom von rechts, wobei die Entfernung zu der Wand auf dieser Seite sehr groß sein soll:

$$W_2 = \frac{1}{2} c_v \rho \int_0^{\frac{v}{\lambda}} \int_0^{\infty} \theta(x+z) e^{-\frac{z}{\lambda} \cos \vartheta} \sin \vartheta \, dz \, d\vartheta \quad (4.4.14)$$

Zu W_1 kommen noch die an der linken Wand reflektierten Moleküle, die einen Weg zurückgelegt haben, der größer als x ist. Deren Temperatur θ_R gab Smoluchowski durch eine Formel an, die einen unbestimmten Parameter α enthielt:

$$\theta_R = \theta_W + \alpha(\theta_L - \theta_W) \quad (4.4.15)$$

Die Temperatur der Wand wird hier mit θ_W , die der auf sie zulaufenden Moleküle mit θ_L bezeichnet. Kundt und Warburg gingen bei der Reibung von der speziellen Annahme $\alpha=0$ aus. Im Fall $\alpha=1$ würde es sich um eine völlig spiegelnde Oberfläche handeln. Der Strom der reflektierten Teilchen W_3 ist daher:

$$W_3 = \frac{1}{2} c_v \rho \int_0^{\frac{v}{\lambda}} \int_x^{\infty} \theta_R e^{-\frac{z}{\lambda} \cos \vartheta} \sin \vartheta \, dz \, d\vartheta \quad (4.4.16)$$

Mit der schon in 4.1 (S. 107) benützten Abkürzung

$$\Phi(z) = \int_0^{\frac{v}{\lambda}} e^{-\frac{z}{\lambda} \cos \vartheta} \sin \vartheta \, d\vartheta = \int_{\frac{1}{\lambda}}^{\infty} \frac{e^{-z\lambda}}{\lambda^2 \lambda} \, d\lambda \quad (4.4.17)$$

erhält die Stationaritätsbedingung $W_2 - W_1 - W_3 = \text{const.} = C$ die Form:

$$\frac{1}{2} c_v \rho \int_0^{\frac{v}{\lambda}} \left| \int_0^{\infty} \theta(x+z) \Phi(z) \, dz - \int_0^x \theta(x-z) \Phi(z) \, dz - \theta_R \int_x^{\infty} \Phi(z) \, dz \right| = C \quad (4.4.18)$$

In der Variablen $y = \theta - \theta_R$ wird daraus:

$$\frac{1}{2} c_v \rho \int_0^{\frac{v}{\lambda}} \left| \int_0^{\infty} y(x+z) \Phi(z) \, dz - \int_0^x y(x-z) \Phi(z) \, dz \right| = C \quad (4.4.19)$$

Diese Integralgleichung für $y(z)$ ist, von einem Faktor abgesehen, identisch mit (4.1.17) und folglich auch mit (4.1.12), der von

Kundt und Warburg aufgestellten Integralgleichung für die Geschwindigkeit $u(z)$. Smoluchowski wählte als Näherungslösung von (4.4.19) den Ansatz $y_w(z) = c_0 + c_1 z + c_2 e^{-\int z}$. Die vier Koeffizienten bestimmte er durch die Forderung, daß y_w die Gleichung (4.4.19) in den Punkten $z = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 1$ erfüllen sollte. Das lieferte einen Temperatursprungkoeffizienten $\gamma' = 0,7$, der im allgemeinen noch durch die Addition eines von α abhängigen Summanden vergrößert wurde. Smoluchowskis Wert für γ' wich nur ganz geringfügig von dem Ergebnis (4.1.19) ab, das Kundt und Warburg mit einer gröberen Näherung für γ gefunden hatten.

Für Smoluchowski besaß diese Herleitung eine über das konkrete Problem hinausreichende Bedeutung. Sie schien ihm "geradezu einen neuen Beweis für die Richtigkeit" der kinetischen Gastheorie zu bilden.¹⁸ In der nur wenig später angefertigten englischen Fassung seiner Veröffentlichung ging er offenbar von einer Leserschaft aus, die der kinetischen Gastheorie weniger kritisch gegenüberstand als die deutsche¹⁹: "Diese völlige Übereinstimmung zwischen den experimentellen Tatsachen und der kinetischen Gastheorie könnte als ein neuer zwingender Beweis für die letztere betrachtet werden, wenn es eines solchen Beweises überhaupt noch bedurft hätte."²⁰

Schon in Berlin hoffte Smoluchowski, mit der Arbeit über den Temperatursprung eine hinreichende Grundlage für einen Habilitationsantrag in Wien zu schaffen.²¹ Die beiden Aufsätze hierzu rundeten nun die Publikationsliste ab, die er seinem Gesuch auf Erteilung der *venia legendi* vom 20.3.1898 beifügte. In dem ebenfalls einzureichenden Programm der Vorlesungen, die Smoluchowski zu halten beabsichtigte, nannte er neben drei anderen Themen auch die kinetische Gastheorie.²² Die aus den Professoren Lang, Mertens, Boltzmann und Gegenbauer bestehende Kommission beurteilte

in ihrem Gutachten seine Leistungen positiv: "... in allem aber bekundet Dr.Smoluchowski eine gründliche theoretische und experimentelle Schulung, die zu den besten Hoffnungen für die Zukunft berechtigt".²³ Am 6.6.1898 hielt er seine Probevorlesung, die den Titel trug: "Die Energie-Vertheilung im Spectrum eines schwarzen Körpers".²⁴ Daraufhin wurde er am 31.7.1898 zum Privatdozenten ernannt.²⁵ Im folgenden Jahr wechselte er nach Lemberg, wo er von 1900 an die Position eines außerordentlichen Professors bekleidete.²⁶ Durch seine Arbeiten über Schwingungserscheinungen, wie die Brownsche Bewegung und die Opaleszenz, war er dann aktiv an einer Entwicklung beteiligt, die schließlich zu einer allgemeinen Anerkennung der kinetischen Gastheorie führte.

4.5 Die kinetische Gastheorie in der kritischen Diskussion

In den siebziger Jahren wuchs das Vertrauen in die Grundlagen der kinetischen Gastheorie. O.E.Meyer charakterisierte diese Zeit rückblickend, als die der "schönsten und raschesten Entwicklung"¹. Beinahe gleichzeitig erschienen mit H.W.Watsons "A Treatise on the Kinetic Theory of Gases" 1876 in England und O.E.Meyers "Die Kinetische Theorie der Gase" 1877² in Deutschland die ersten Lehrbücher. Angesichts der wachsenden Zahl von Veröffentlichungen erfüllten sie die Aufgabe, einem breiteren Leserkreis eine Übersicht zu verschaffen. Die zum Teil mathematisch anspruchsvollen Originalarbeiten waren für viele Naturwissenschaftler zu kompliziert. Deshalb trennte Meyer in seinem Buch die Rechnungen von der übrigen Darstellung und fügte sie am Schluß als "Mathematische Zusätze" an. Durch Zitate in den allgemeinen Lehrbüchern fand "der Meyer" im deutschsprachigen Bereich auch indirekt größere Verbreitung.³

Die Ideen der kinetischen Gastheorie wurden in der Physik so zum Allgemeingut. Jedoch fielen die experimentellen Überprüfungen, wie die der Temperaturabhängigkeit der Transportkoeffizienten, zunehmend kritisch für sie aus. In seinem Handbuchartikel von 1891 kommentierte Leo Graetz die Situation im Fall der Reibung mit den Worten: "Es gibt keine genügende Erklärung für dieses Verhalten aus der Gastheorie allein."⁴ Die spezifischen Wärmen bildeten weiterhin ein offenes Problem. Eine noch grundlegendere Schwierigkeit, die alle mechanischen Modelle in Frage stellte, ging von der Interpretation des zweiten Hauptsatzes aus. Die in der Thermodynamik irreversibler Prozesse existierende Auszeichnung einer Zeitrichtung schien mit den umkehrbaren Gesetzen der Mechanik nicht vereinbar zu sein. Zu diesem schon in den siebziger Jahren von

J.Loschmidt erhobenen Umkehreinwand⁵ kam der 1890 von Poincaré formulierte Wiederkehrreinwand. Danach sollte sich ein mechanisches System einer einmal angenommenen Konfiguration im Laufe der Zeit wieder beliebig annähern.⁶ Boltzmann setzte dem eine statistische Auffassung des zweiten Hauptsatzes entgegen.⁷ All das bildete den Hintergrund für eine eher skeptische Haltung vieler Physiker. L.Natanson, den seine Publikationen als einen Anhänger der kinetischen Gastheorie ausweisen⁸, artikulierte diese Stimmung am 2.7.1890 in einem Brief an einen Kollegen. Er äußerte sich zu der geplanten zweiten Auflage von Meyers Buch: "Nun bin ich in hohem Grade darüber gespannt, wie Prof. Meyer die vielen wichtigen Fragen, die in dieser Theorie ganz hoffnungslos dunkel sind, erledigen wird."⁹ Die Schwächen der kinetischen Gastheorie boten nun einen konkreten Anlaß, um die vorzugsweise im deutschen Sprachraum schon länger vorhandenen prinzipiellen Differenzen über die Methoden physikalischer Forschung auszutragen.¹⁰

Dem mechanischen Modell und den dazugehörigen Hypothesen über die Atome standen verschiedene phänomenologische Ansätze gegenüber. So benützte M.Planck nur die Hauptsätze der Thermodynamik als Grundlage der Wärmetheorie. Die damit erzielten Erfolge übertrafen, wie er 1891 meinte, die der kinetischen Gastheorie, bei welcher der "Aufwand von physikalischem Scharfsinn und mathematischer Geschicklichkeit nicht im wünschenswerthen Verhältnis steht zu der Fruchtbarkeit der gewonnenen Resultate."¹¹ Eine spezielle Richtung, die sich auf die makroskopischen Erscheinungen beschränkte, bildete die sogenannte Energetik. Ihre Grundlagen wurden 1887 von G.Helm¹² und ab 1892 in ähnlicher Weise auch von W.Ostwald¹³ formuliert. Anknüpfend an Avenarius, Kirchhoff und Mach strebten sie eine einfache bzw. ökonomische Darstellung der Naturvorgänge an.¹⁴ Den mechanischen Modellen machten sie den

Vorwurf, über die sinnliche Erfahrung hinauszugehen. Es sollte überhaupt nicht nach einem hinter den Phänomenen verborgenen Mechanismus, nach der Existenz des Absoluten gesucht werden, denn nur die Beziehungen zwischen den Dingen wären der Erkenntnis zugänglich.¹⁵ Da sich in ihrer Sicht alles Geschehen als Energieumwandlung in Raum und Zeit begreifen ließ¹⁶, erhoben sie den Energiesatz in den Rang einer Weltformel im Sinn von Laplace.¹⁷ Hiermit glaubten sie eine Methode gefunden zu haben, um in einer bilderfreien Sprache reden zu können.¹⁸ Ostwald nützte auch die von ihm herausgegebene "Zeitschrift für physikalische Chemie" als Forum gegen die kinetische Gastheorie. So wies er 1894 in seiner Rezension des ersten Teils der zweiten Auflage von Meyers Buch auf die geringen inhaltlichen Veränderungen hin, die es seit der ersten Auflage gegeben hätte. Er fuhr fort: "Eine solche Unfruchtbarkeit bei einer Anschauung, welcher sich fast ausnahmslos alle Forscher in der Physik und Chemie ergeben haben, scheint ein unwiderleglicher experimenteller Beweis dafür zu sein, dass diese Anschauung selbst verfehlt war, und dass das nützliche, was sie leisten konnte, in den ersten Arbeiten erschöpft ward, durch welche sie in die Wissenschaft eingeführt wurde."¹⁹ Nach kontroversen Diskussionen mit Ostwald und Helm auf der Naturforscherversammlung 1895 in Lübeck²⁰ präzierte Boltzmann seinen Standpunkt in mehreren Aufsätzen. Die Forderung nach einer *möglichst* hypothesenfreien Theorie machte er sich zu eigen.²¹ Das bedeutete für ihn aber keineswegs, auf mechanische Bilder verzichten zu müssen. Es ging nur darum, sie von "willkürlichen" Annahmen weitgehend frei zu halten²². Boltzmanns Interpretation bewegte sich ohnehin auf einer abstrakten Ebene, wenn er beispielsweise die Moleküle nicht als materielle Punkte, sondern als unbekannte, durch generalisierte Koordinaten bestimmte Systeme ansah.²³ Die

mechanische Naturerklärung verband er jedoch mit keinem Ausschließlichkeitsanspruch. Auch andere Wege erschienen denkbar. Es reichte ihm aus, über eine sinnvolle und nützliche Methode verfügen zu können.²⁴ Die Frage nach der Realität der Atome hatte deshalb keine besondere Bedeutung: "Freilich unsere molekulartheoretischen Begriffe existieren nur in uns; aber die Erscheinungen, die ihnen konform sind, existieren unabhängig von uns, und wenn wir heute statt zu sagen: 'Die Moleküle existieren' lieber der Phrase bedienen, 'unsere betreffenden Vorstellungsbilder sind ein einfaches und zweckmäßiges Bild der beobachtbaren Erscheinungen', so mag die Ausdrucksweise gewisse Vorteile haben, im Wesen aber dachte man sich bei der alten genau dasselbe."²⁵ Boltzmann übernahm hier eine Terminologie, die physikalisches Modell und Realität deutlich auseinanderhielt. Diesen Unterschied betonte auch E. Warburg in seinem Lehrbuch von 1893: "Eine Hypothese, wie die geschilderte kinetische Theorie der Gase, kann nützlich sein, indem sie die Eigenschaften der Körper verständlich macht und zur Entdeckung neuer Thatsachen führt. Werden ihre Consequenzen mit der Erfahrung im Einklang gefunden, so ist sie als zulässig, keineswegs aber als in der Natur wirklich zutreffend erwiesen."²⁶ Die erwähnten Probleme der kinetischen Gastheorie hätten sich mit einem Realitätsanspruch nicht vereinbaren lassen. Ohne ihn konnten die "Vorstellungsbilder" in einem durch die Erfahrung zu bestimmenden Bereich weiterhin als Arbeitsmittel dienen. Die Energetik, die aufgrund innerer Widersprüche bald aus der Diskussion verschwand²⁷, war die Folge, nicht die Ursache einer Unsicherheit über die Grenzen und Möglichkeiten eines mechanischen Weltbilds.²⁸

Zusammenfassung

In der Mitte des 19. Jahrhunderts verschwand die stoffliche Auffassung der Wärme allmählich. Analogien zum Licht legten die Vermutung nahe, es könnte sich um eine Form von Bewegung handeln. Diese Ideen erhielten mit dem Prinzip von der Erhaltung der Energie damals auch eine quantitative Grundlage. Bei den Gasen wurden zunächst Schwingungen der Moleküle um ihre Ruhelage angenommen. August Krönig zeigte 1856, wie einfach die Gasgesetze aus einer freien und geradlinigen Bewegung der kleinsten Teilchen folgten. Rudolph Clausius stellte Krönigs Hypothese wenig später in einen größeren physikalischen Zusammenhang. Die Analyse von Clausius' bis dahin veröffentlichten Arbeiten erhärtet dessen Behauptung, sich mit solchen Überlegungen schon länger beschäftigt zu haben. An seiner Biographie wird außerdem deutlich, daß die mathematische Physik einen gewissen Freiraum für Hypothesen beanspruchen durfte. Die hohe Geschwindigkeit der geradlinigen Molekülbewegung schien jedoch dem experimentellen Faktum der relativ langsam ablaufenden Transportvorgänge zu widersprechen. Clausius entkräftete solche Einwände mit dem Konzept der mittleren freien Weglänge. Dabei benützte er die von R. Hoppe diskutierte Alternative der kurzen Wegstrecken eines Moleküls zwischen zwei Stößen und verknüpfte sie mit Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen, die viele seiner Kollegen noch grundsätzlich ablehnten.

Maxwell gelang es dann 1860, eine neue, experimentell überprüfbare Aussage der Theorie zu finden. Es war die ihm erstaunlich vorkommende Druckunabhängigkeit des Reibungskoeffizienten. Zu jener Zeit wurden verschiedene Methoden zur Messung der Flüssigkeitsreibung entwickelt. Eine von ihnen ließ sich ebenso für die Bestimmung der Gasreibung verwenden. Man beobachtete hier die

gedämpften Schwingungen einer Scheibe in der zu untersuchenden Substanz. Die Theorie dieses auf Coulomb zurückgehenden Versuchs formulierte O.E.Meyer. Er führte die Experimente auch selbst durch und bestätigte im wesentlichen Maxwells Vorhersagen. Das Modell der kinetischen Gastheorie gewann an Attraktivität. Meyers Forschung veränderte sich unter diesem Eindruck. Hatte er anfangs eher phänomenologisch gearbeitet und partielle Differentialgleichungen aufgestellt, um Naturvorgänge möglichst gut wiederzugeben, so suchte er später nach den grundlegenden Gesetzen und Zusammenhängen.

August Kundt und Emil Warburg, Absolventen des Privatlaboratoriums von Gustav Magnus in Berlin, demonstrierten 1875 mit ihrer Untersuchung über die Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase die noch gar nicht voll genützte Leistungsfähigkeit des Konzepts der mittleren freien Weglänge. Allein dessen Anwendung erlaubte es, die untere Grenze für die Druckunabhängigkeit der Reibung zu berechnen. Darüber hinaus sollte es eine Gleitung geben. Das bezeichnete die endliche Geschwindigkeit der unmittelbar an der ruhenden Gefäßwand befindlichen Schicht einer Gasströmung. Helmholtz hatte den Flüssigkeiten die Eigenschaft zugeschrieben, auf glatten Flächen zu "gleiten". Das war zwar falsch wie sich später erweisen sollte, aber dieser Begriff wurde von den Physikern angenommen und tauchte bald auch in der Gastheorie auf. Kundt und Warburg lieferten nun eine mikroskopische Begründung für die Gleitung der Gase. Das Ziel ihrer Forschung war eigentlich die Messung der Wärmestrahlung als Funktion der Temperatur gewesen. Die Reduktion der konkurrierenden Vorgänge der Strömung und der Leitung verlangte jedoch zunächst deren Beherrschung bei sehr geringen Dichten. Während sie ihre Berechnungen zur Reibung experimentell bestätigen konnten, gelang ihnen dies für die

Wärmeleitung nicht. Dabei sollte es, analog zur Gleitung, einen Temperatursprung an den Gefäßwänden geben. M.v.Smoluchowski, der 1897 von Warburg auf diese Fragestellung aufmerksam gemacht wurde, glückte der fehlende Nachweis. Mittlerweile war das Interesse an der kinetischen Gastheorie geringer geworden, denn ihre Möglichkeiten schienen ausgereizt.

Die Erklärung der Transportphänomene, bei denen die inneren Freiheitsgrade keine Rolle spielen, gehörte lange Zeit zu den wichtigsten Argumenten für die kinetische Gastheorie.

AN H A N G I

Die Lebensdaten der wichtigsten im Text vorkommenden Personen

Baily, Francis	28. 4.1774 - 30. 8.1844
v.Baumgartner, Andreas	28.11.1793 - 30. 7.1865
Bernoulli, Daniel	29. 1.1700 - 17. 3.1782
Berzelius, Jakob	29. 8.1779 - 7. 8.1848
v.Bezold, Wilhelm	21. 6.1837 - 17. 2.1907
du Bois-Reymond, Emil	7.11.1818 - 26.12.1896
du Bois-Reymond, Paul	2.12.1831 - 7. 4.1889
Boltzmann, Ludwig	20. 2.1844 - 5. 9.1906
Buys-Ballot, C.H.D.	10.10.1817 - 3. 2.1890
Carnot, Sadi	1. 6.1796 - 24. 8.1832
Cauchy, Augustin Louis	21. 8.1789 - 23. 5.1857
Christoffel, Elwin	10.11.1829 - 15. 3.1900
Clapeyron, B.P.É.	26. 1.1799 - 28. 1.1864
Clausius, Rudolph	2. 1.1822 - 24. 8.1888
Coulomb, Charles Augustin	14. 6.1736 - 23. 8.1806
Davy, Humphry	17.12.1778 - 29. 5.1829
Dirichlet, G.P.Lejeune	13. 2.1805 - 5. 5.1859
Dove, Heinrich Wilhelm	6.10.1803 - 4. 4.1879
Dulong, Pierre Louis	12. 2.1785 - 19. 7.1838
Encke, Johann Franz	23. 9.1791 - 26. 8.1865
Erman, Adolph	12. 5.1806 - 12. 7.1877
Frankenheim, Moritz Ludwig	29. 6.1801 - 14. 1.1869
Graetz, Leo	26. 9.1856 - 12.11.1941
Graham, Thomas	20.12.1805 - 16. 9.1869
Grove, William Robert	11. 7.1811 - 2. 8.1896
Hagen, Gotthilf	3. 3.1797 - 3. 2.1884
Hagenbach (-Bischoff), Eduard	20. 2.1833 - 23.12.1910

Helm, Georg	15. 3.1851 - 13. 9.1923
Helmholtz, Hermann	31. 8.1821 - 8. 9.1894
Herapath, John	30. 5.1790 - 24.12.1868
Hertz, Heinrich	22. 2.1857 - 1. 1.1894
Hoppe, Reinhold	18.11.1816 - 9. 6.1900
Jochmann, Emil	29. 7.1833 - 22. 1.1871
Jolly, Philipp	26. 9.1809 - 24.12.1884
Joule, James Prescott	24.12.1818 - 11.10.1889
Kirchhoff, Gustav	12. 3.1824 - 17.10.1887
Kohlrausch, Friedrich	14.10.1840 - 17. 1.1910
Krönig, August	20. 9.1822 - 5. 6.1879
Kundt, August	18.11.1839 - 21. 5.1894
Ladenburg, Rudolf	6. 6.1882 - 3. 4.1952
Laplace, Pierre Simon	28. 3.1749 - 5. 3.1827
Loschmidt, Joseph	15. 3.1821 - 8. 7.1895
Magnus, Gustav	2. 5.1802 - 4. 4.1870
Maxwell, James Clerk	13. 6.1831 - 5.11.1879
Meyer, Lothar	19. 8.1830 - 12. 4.1895
Meyer, Oskar Emil	15.10.1834 - 21. 4.1909
Mitscherlich, Eilhard	7. 1.1794 - 28. 8.1863
Müller, Johann Heinrich	30. 4.1809 - 3.10.1875
Narr, Friedrich	16. 8.1844 - 8.10.1893
Natanson, Ladislaus	18. 6.1864 - 26. 2.1937
Navier, C.L.M.H.	15. 2.1785 - 23. 8.1836
Nernst, Walther	25. 6.1864 - 18.11.1941
Neumann, Carl	7. 5.1832 - 27. 3.1925
Neumann, Franz	11. 9.1798 - 23. 5.1895
Ostwald, Wilhelm	2. 9.1853 - 4. 4.1932
Petit, Alexis Thérèse	2.10.1791 - 21. 6.1820
v.Piotrowski, Gustav	1. 3.1833 - 31.12.1884

Planck, Max	23. 4.1858 - 4.10.1947
Poggendorff, Johann Christian	29.12.1796 - 24. 1.1877
Poincaré, Henri	29. 4.1854 - 17. 7.1912
Poiseuille, J.L.M.	22. 4.1799 - 26.12.1869
Poisson, Siméon Denis	21. 6.1781 - 25. 4.1840
Regnault, Victor	21. 7.1810 - 19. 1.1878
Riemann, Bernhard	17. 9.1826 - 20. 7.1866
v.Roggenbach, Franz Freiherr	23. 3.1825 - 24. 5.1907
Röntgen, Wilhelm Conrad	27. 3.1845 - 10. 2.1923
Rumford, Benjamin Thompson Graf	26. 3.1753 - 21. 8.1814
v.Smoluchowski, Marian	28. 5.1872 - 5. 9.1917
Sabine, Edward	14.10.1788 - 26. 6.1883
Stefan, Josef	24. 3.1835 - 7. 1.1893
Stokes, Georg Gabriel	13. 8.1819 - 1. 2.1903
Thomson, William (Lord Kelvin)	26. 6.1824 - 17.12.1907
Warburg, Emil	9. 3.1846 - 28. 7.1931
Waterston, John James	1811 - 18. 6.1883
Weber, Wilhelm	24.10.1804 - 23. 6.1891
Wertheim, Theodor	25.12.1820 - 6. 7.1864
Wiedemann, Gustav	2.10.1826 - 23. 3.1899
Wiener, Otto	15. 6.1862 - 18. 1.1927
Wilhelmy, Ludwig	25.12.1812 - 18. 2.1864

A N H A N G II

Die Berechnung einer Näherung für die Lösung der Integralgleichung (4.1.12)

Kundt und Warburg verwendeten hier zwei Größen. Das ist zum einen der Impulsbetrag, der von den Schichten mit den Koordinaten $z > h$ pro Zeit- und Flächeneinheit auf die Wand mit $z=0$ übertragen wird. Analog zu (4.1.4) findet man:

$$R_h(0) = \frac{1}{2} \int \frac{\gamma}{l} \int_b^{\infty} \int_{\frac{1}{2}l}^{\infty} u(x) \frac{e^{-\lambda x}}{\lambda^2 l} d\lambda dx \quad (\text{II.1})$$

Zum anderen handelt es sich um den Ausdruck für den Anteil an der mittleren Geschwindigkeit der Schicht $z=0$, der von den Molekülen aus den Schichten mit $z > h$ herrührt. Nach (4.1.12) gilt:

$$u_h(0) = \frac{1}{2} \int_b^{\infty} \int_{\frac{1}{2}l}^{\infty} u(x) \frac{e^{-\lambda x}}{\lambda l} d\lambda dx \quad (\text{II.2})$$

Eine erste Näherung setzten sie als lineare Funktion an:

$$u(z) = a + b(z-h) \quad (\text{II.3})$$

Folgende Abkürzungen sind hilfreich:

$$h/l = \delta \qquad e^{-\delta} = \epsilon$$

Außerdem wird das Symbol für den Integrallogarithmus benützt:

$$\text{Li}(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} dt / \ln(t) = - \int_0^{\infty} (e^{-u} / u) du \quad (\text{II.4})$$

Kundt und Warburg gebrauchten eine Definition, die sich um ein Vorzeichen davon unterscheidet.

Die Ausführung der Integrationen von (II.1) und (II.2) mit (II.3) ergibt dann bei Ausnutzung der Regel (4.1.7):

$$u_h(0) = \frac{1}{2} a [\varepsilon + \delta \operatorname{Li}(\varepsilon)] + \frac{1}{2} b_1 [\varepsilon - \delta \varepsilon - \delta^2 \operatorname{Li}(\varepsilon)] \quad (\text{II.5})$$

$$R_b(0) = \frac{1}{2} g_{va} [\varepsilon - \delta \varepsilon - \delta^2 \operatorname{Li}(\varepsilon)] + (1/6) g_{vbl} [\varepsilon - \frac{1}{2} \delta \varepsilon + \frac{1}{2} \delta^2 \operatorname{Li}(\varepsilon)] \quad (\text{II.6})$$

Mit den Bezeichnungen

$$\varepsilon + \delta \operatorname{Li}(\varepsilon) = \Gamma(\delta) \quad (\text{II.7a})$$

$$\varepsilon - \delta \varepsilon - \delta^2 \operatorname{Li}(\varepsilon) = \sigma(\delta) \quad (\text{II.7b})$$

$$\varepsilon - \frac{1}{2} \delta \varepsilon + \frac{1}{2} \delta^2 \varepsilon + \frac{1}{2} \delta^2 \operatorname{Li}(\varepsilon) = \Omega(\delta) \quad (\text{II.7c})$$

lassen sich (II.5) und (II.6) in kürzerer Form schreiben:

$$u_h(0) = \frac{1}{2} a \Gamma(\delta) + \frac{1}{2} b_1 \sigma(\delta) \quad (\text{II.8})$$

$$R_b(0) = \frac{1}{2} g_{va} \sigma(\delta) + (1/6) g_{vbl} \Omega(\delta) \quad (\text{II.9})$$

Kundt und Warburg setzten nun $h=0$. Da $\Gamma(0)=\sigma(0)=\Omega(0)=1$, folgt:

$$u_0(0) \equiv u(0) = \frac{1}{2} a + \frac{1}{2} b_1 \quad (\text{II.10})$$

$$R_0(0) \equiv R(0) = \frac{1}{2} g_{va} + (1/6) g_{vbl} \quad (\text{II.11})$$

Nach (II.3) ist $u(0)=a$, womit

$$\frac{1}{2} a = \frac{1}{2} b_1 \quad (\text{II.12})$$

$$R(0) = (1/8) g_{vbl} + (1/6) g_{vbl} = (7/8) [(1/3) g_{vbl}] \quad b = (7/8) \mu b \quad (\text{II.13})$$

Für den Gleitungskoeffizienten erhält man daraus:

$$\gamma = u(0)/b = \frac{1}{2} \quad (\text{II.14})$$

In einer zweiten Näherung wurde der Geschwindigkeitsverlauf $u(z)$ aus zwei Geraden mit verschiedenen Steigungen zusammengesetzt:

$$u(z) = u(1) + b(z - 1) \quad z > 1 \quad (\text{II.15a})$$

$$u(z) = u(0) + b_1 z \quad z < 1 \quad (\text{II.15b})$$

Die Steigung b_1 sollte durch die Bedingung $R(z)=\text{const.}=R(0)=\mu b$ bestimmt werden. Der Teil von $R(0)$, der von den Schichten $z > 1$ herrührt, ist nach (II.1) $R_1(0)$. Der Beitrag aus dem Intervall $[0,1]$ wird durch die Differenz $R_0(0) - R_1(0)$ gegeben, wobei (II.15b) gilt:

$$\begin{aligned} \mu b &= [\chi \int v u(1) \sigma(1) + (1/6) \int v b_1 \Omega(1)] + [\chi \int v u(0) + (1/6) \int v b_1] \\ &- [\chi \int v u(1) \sigma(1) + (1/6) \int v b_1 \Omega(1)] \end{aligned} \quad (\text{II.16a})$$

Nach einer Umformung ist das:

$$\chi u(0) + (1/6) b_1 [1 - \Omega(1)] = b_1 [(1/3) - (1/6) \Omega(1)] \quad (\text{II.16b})$$

Eine entsprechende Beziehung wird für die Größe u aufgestellt:

$$\begin{aligned} u(0) &= [\chi u(0) \Gamma(1) + \chi b_1 \sigma(1)] + [\chi u(0) + \chi b_1] \\ &- [\chi u(0) \Gamma(1) + \chi b_1 \sigma(1)] \end{aligned} \quad (\text{II.17a})$$

Umgeformt:

$$\chi u(0) - \chi b_1 [1 - \sigma(1)] = \chi b_1 \sigma(1) \quad (\text{II.17b})$$

Mit den aus den Tafeln für den Integrallogarithmus zu erhaltenden Werten für $\Omega(1)$ sowie $\sigma(1)$ ergeben (II.16b) und (II.17b):

$$b_1 = 1,18832 b \quad (\text{II.18})$$

$$u(0) = 0,57352 b_1 \quad (\text{II.19})$$

Schließlich liefert $b = (b_1 + u(0)) / (\nu + 1)$ den Gleitungskoeffizienten

$$\nu = 0,761 \quad (\text{II.20})$$

F U ß N O T E N

Einleitung

- ¹ J.Stefan, "Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen. Erste Abhandlung", *Berichte der Wiener Akademie*, 1872, 65:45-69, hier:48.
- ² H.H.Jensen, H.Smith, P.Wölfle, K.Nagai u. T.M.Bisgaard, "Boundary Effects in Fluid Flow. Application to Quantum Fluids", *Journal Low Temp. Phys.*, 1980:41, 473-519.
- ³ A.Einstein, "Emil Warburg als Forscher", *Die Naturwissenschaften*, 1922, 10:823-828, hier:823-824; zitiert z.B. in H.Ramser, "Warburg", *Dictionary of Scientific Biography*, New York 1976, 14:170-172.
- ⁴ M.Planck, "Allgemeines zur neueren Entwicklung der Wärmetheorie", *Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Halle 1891*, Leipzig 1891, 55-61, hier:55.
- ⁵ L.Boltzmann, *Vorlesungen über Gastheorie*, II.Teil, Leipzig: Ambrosius Barth 1898, Vorwort. Bei der anderen Arbeit handelte es sich um Ramsays Einordnung der Edelgase in das Periodensystem aufgrund der Bestimmung ihrer spezifischen Wärmen.

Abschnitt 1.1

- ¹ C.Truesdell, "Early Kinetic Theories of Gases", *Archive for History of Exact Sciences*, 1975, 15:1-66, hier:2-7.
- ² S.G.Brush, *The Kind of Motion We Call Heat*, Band 1: *Physics and Atomists*. North-Holland 1976, 107-159.
- ³ R.Fox, *The Caloric Theory of Gases from Lavoisier to Regnault*, Oxford 1971, 99.
- ⁴ T.Kuhn, "The Caloric Theory of Adiabatic Compression", *Isis* 1958, 49:132-140, hier:139.
- ⁵ S.G.Brush, *Kinetische Theorie*, Band 1: *Die Natur der Gase und der Wärme*, Braunschweig: Vieweg 1970, 29-31.
- ⁶ C.Truesdell, *The Tragicomical History of Thermodynamics 1822-1854*, New York, Heidelberg, New York: Springer 1980, 36-38.
- ⁷ C.Truesdell nennt sie das Laplace-Poissonsche Gesetz, ebd., 38.
- ⁸ S.Carnot, *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propres à développer cette Puissance*, Paris 1824; übersetzt in: Ostwalds Klassiker Nr.37, *Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen*, Leipzig: Engelmann 1909. Dazu auch: M.Planck, *Das Prinzip von der Erhaltung der Energie*, Leipzig: Teubner 1887, 15-17; E.Mach, *Die Principien der Wärmelehre*, Leipzig: Ambrosius Barth 1896, 215-224; U.Hoyer, "Carnots Réflexions - zur Entstehung der Thermodynamik vor 150 Jahren", *Physikalische Blätter*, 1974, 30:385-393; H.-G.Schöpf, "Das Carnotsche Paradigma und seine erkenntnistheoretischen Implikationen", *Annalen der Physik*, 1984, 41:151-160.
Aus einer erst posthum herausgegebenen Schrift geht hervor, daß Carnot sich wenige Jahre später von der Stofftheorie zu distanzieren begann. W.Ostwald in seinem obengenannten Klassiker, 68.
- ⁹ J.Fourier, *Théorie Analytique de la Chaleur*, Paris 1822; C.Truesdell (Fußnote 6), 59-60.
- ¹⁰ Darauf weist insbesondere Brush hin. In seinem Buch (Fußnote 2) widmet er dem ein ganzes Kapitel: Band 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*, 303-324. Dies soll den nach seiner Ansicht allmählichen Übergang von der stofflichen zur kinetischen Auffassung der Wärme verständlich machen. Die folgenden Zitate von Helmholtz, Clausius und v. Baumgartner lassen Zweifel daran zu, ob diese These allgemein gültig sein kann.
- ¹¹ So H.W.Dove, *Repertorium der Physik*, Band 4, Berlin 1841, 326.
- ¹² Insoweit ist der Theoriebegriff hier fragwürdig. Auch Brush räumt dies ein (Fußnote 2), Band 2, 306-307.
- ¹³ Dieses Problem erwähnte beispielsweise G.Karsten in: *Lehrgang der mechanischen Naturlehre für höhere Unterrichtsanstalten*, 2. Abteilung, 1851, 398-400.

- ¹⁴ Auf die verschiedenen Autoren geht T.Kuhn, "Die Erhaltung der Energie als Beispiel gleichzeitiger Entdeckung" ein. Deutsche Übersetzung in: *Die Entstehung des Neuen*, Frankfurt:Suhrkamp 1977, 125-168. Wirkungsgeschichtlich kann H.Helmholtz, *Ueber die Erhaltung der Kraft*, Berlin 1847, für den deutschen Sprachraum hervorgehoben werden. So empfahl auch Werner Siemens seinem Bruder Wilhelm diese Darstellung, weil sie die Zusammenhänge am klarsten wiedergebe. Brief von Werner an Wilhelm Siemens vom 13.3.1853, Archiv des Siemens Museums München.
- ¹⁵ Diese Ansicht vertrat z.B. R.Mayer in "Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" von 1842. Nachgedruckt in Ostwalds Klassiker Nr.180: R.Mayer, *Die Mechanik der Wärme*, Leipzig: Engelmann 1911, 3-8, hier:7.
- ¹⁶ L.Wilhelmy, *Der Versuch einer mathematisch-physikalischen Wärme-Theorie*, Heidelberg 1851, 6.
- ¹⁷ Autoreferat von Buys-Ballot, "Schets eener physiologie van het onbewerktuigde ryk der Natuur", *Fortschritte der Physik für 1849*, 1853, 5:3-16, hier:12; R.Clausius, "Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen", *Annalen der Physik*, 1850, 79:368-397 und 500-524, hier:372-373; L.Wilhelmy (Fußnote 16), 21.
- ¹⁸ H.Helmholtz (Fußnote 14), 30.
- ¹⁹ H.Helmholtz in einem ausführlichen Referat über die Theorie der Wärme in *Fortschritten der Physik für 1850 und 1851*, 1855, 6 und 7:561-598, hier:564.
- ²⁰ R.Clausius (Fußnote 17), 369-370.
- ²¹ R.Clausius, "Ueber das Wesen der Wärme, verglichen mit Licht und Schall", *Monatsschrift des wissenschaftlichen Vereins in Zürich*, 1857, 2:73-99. Den Hinweis darauf entnahm ich Brush (Fußnote 2), Band 1, 171. Zitiert wird diese Rede auch bei C.Jungnickel u. R.McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, Band 1: *The Torch of Mathematics 1800-1870*, Chicago 1986, 194.
- ²² *Tageblatt der 32. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte in Wien 1856*, 78-79.
- ²³ G.T. Fechner, *Ueber die physikalische und philosophische Atomenlehre*, Leipzig 1855, 10.
- ²⁴ Ebd., 22-23; K.v.Meyenn, "Dispersion und mechanische Athertheorien im 19.Jahrhundert", in P.L.Butzer/F.Feher (Hrsg.), *E.B.Christoffel*, Basel: Birkhäuser 1981, 680-703.
- ²⁵ L.Wilhelmy (Fußnote 16), Buys-Ballot (Fußnote 17). Diese Arbeiten werden von F.Rosenberger in: *Die Geschichte der Physik*, Band III: *Geschichte der Physik in den letzten hundert Jahren*, Braunschweig 1890, 552-555 u. 538-540, diskutiert. Als Außen-seiter kann noch erwähnt werden: F.Redtenbacher, *Das Dynamiden-System. Grundzüge einer mechanischen Physik*, Mannheim 1857.

Abschnitt 1.2

- ¹ A.Krönig, "Grundzüge einer Theorie der Gase", *Annalen der Physik*, 1856, 99:315-322. Das Autoreferat im *Chemischen Zentralblatt*, 1856, 725-730, ist bis auf die an wenigen Stellen benützte indirekte Rede damit identisch. C.Truesdell hält dies irrtümlich für eine unabhängige Besprechung: "Early Kinetic Theories of Gases", *Archive for History of Exact Sciences*, 1975, 15:1-66, hier:21.
- ² "Nachruf", *Fortschritte der Physik für 1874*, 1879, 30, vier Seiten, nicht paginiert (folgt direkt der Inhaltsangabe); G.Ronge, "Zur Geschichte der kinetischen Wärmetheorie mit biographischen Notizen zu August Karl Krönig", *Gesnerus*, 1961, 18:45-70, hier:68.
- ³ Eine Erklärung Krönigs vom 5.7.1843, daß die Dissertation ohne fremde Hilfe angefertigt worden sei, ist einem in Latein geschriebenen Lebenslauf beigelegt, der folgendes Thema nennt: "De Calore solari in corporibus organicis latente". STPK, Sammlung Darmstaedter, Krönig Fla 1856(3).
- ⁴ A.Krönig, *De acidi chromici salibus crystallibus*, Dissertation Berolina 1845.
- ⁵ G.Schubring, "The Conception of Pure Mathematics as an Instrument in the Professionalization of Mathematics" in H.Mehrtens, H.Bos u. I.Schneider (Hrsg.), *Social History of Nineteenth Century Mathematics*, Boston Basel Stuttgart: Birkhäuser 1981, 111-134, hier:124-125.
- ⁶ "Nachruf" (Fußnote 2).
- ⁷ Mitgliedsliste in *Fortschritte der Physik für 1845*, 1847, 1.
- ⁸ Hermann Helmholtz *über sich selbst*, Leipzig: Teubner 1966, 23.
- ⁹ G.Ronge (Fußnote 2), 68.
- ¹⁰ A.Krönig, *Journal für die Physik und physikalische Chemie des Auslands*, Berlin 1851.
- ¹¹ Nachruf (Fußnote 2).
- ¹² E.Daub weist Ähnlichkeiten in den Formulierungen Krönigs und Waterstons nach: "Waterston's Influence on Krönig's Kinetic Theory of Gases", *Isis*, 1971, 62:512-515; G.Ronges Argumentation für die Unabhängigkeit Krönigs ist nicht überzeugend. Sie stützt sich dabei auf Aussagen von E.Jochmann, einem Nachfolger Krönigs in der Redaktion der *Fortschritte der Physik*: (Fußnote 2), 66.
- ¹³ *Fortschritte der Physik für 1850 u.1851*, 1855, 6 u.7:563, 594.

- ¹⁴ Eine Übersicht der Herausgabebahre der "Fortschritte" findet sich in: E.Brüche, "Aus der Vergangenheit der Physikalischen Gesellschaften V. Die alten Gesellschaftsschriften", *Physikalische Blätter*, 1961, 17:255-232, hier:228-229.
- ¹⁵ H.Helmholtz, "Theorie der Wärme", *Fortschritte der Physik für 1850 u.1851*, 1855, 6 u.7:561-598, hier:594.
- ¹⁶ Ebd., 564.
- ¹⁷ Ebd.
- ¹⁸ Aufstellung der 1858 vor der "Berliner Physikalischen Gesellschaft" von Mitgliedern gehaltenen Vorträge in: *Fortschritte der Physik für 1856*, 1859, 12, XVIII.
- ¹⁹ Bemerkung von E.Jochmann in: "Ueber die Molecularconstitution der Gase", *Annalen der Physik*, 1859, 108:153-162, hier:156.
- ²⁰ G.Ronge (Fußnote 2), 69.
- ²¹ Ebd.
- ²² Davon zeugt ein Brief von A.Krönig an die Königliche Bibliothek vom 3.11.1874, STPK, Sammlung Darmstaedter, Krönig Fla 1856(3).
- ²³ Er verfaßte noch eine religionsphilosophische Schrift: *Ueber das Dasein Gottes und das Glück des Menschen...*, Berlin 1874. Den Hinweis darauf entnahm ich G.Ronge (Fußnote 2), 69.
- ²⁴ Krönigs Arbeit wird u.a. behandelt in: G.Ronge (Fußnote 2), 62-67; I.Schneider, "Rudolph Clausius' Beitrag zur Einführung wahrscheinlichkeits-theoretischer Methoden in die Physik der Gase nach 1856", *Archive for History of Exact Sciences*, 1975, 14:237-261, hier:242-247; C.Truesdell (Fußnote 1), 20-22; S.G.Brush, *The Kind of Motion We Call Heat*, Band 1: *Physics and Atomists*, Amsterdam und New York: North-Holland 1976, 165-167.
- ²⁵ A.Krönig (Fußnote 1), 316.
- ²⁶ Das war eine Charakterisierung von H.Helmholtz' Besprechung in: *Fortschritte der Physik für 1856*, 1859, 12:352-354, hier:352. C.Truesdell findet diese Besprechung, gemessen an der Bedeutung von Krönigs Aufsatz, zu ausführlich: (Fußnote 1), 21. Dabei übersieht er, daß sie einige Jahre später, also schon mit Kenntnis der folgenden Veröffentlichungen von Clausius geschrieben wurde. Daher dürften bei der Abfassung die auch von C.Truesdell nicht in Frage gestellten wirkungsgeschichtlichen Aspekte eine Rolle gespielt haben.
- ²⁷ Helmholtz meinte, sie überrasche durch ihre Einfachheit (Fußnote 26), 352. Auf dieses Zitat weist auch G.Ronge hin: (Fußnote 2), 67.
- ²⁸ Der von Krönig nicht näher erläuterte Wahrscheinlichkeitsbegriff sowie die implizit eingehende Anwendung des Moivre-Laplaceschen-Grenzwertsatzes werden analysiert in: I.Schneider, (Fußnote 24).

- ²⁹ Aufstellung der 1855-1857 vor der "Berliner Physikalischen Gesellschaft" von Mitgliedern gehaltenen Vorträge in: *Fortschritte der Physik für 1855, 1858, 11:XIII.*
- ³⁰ *Archives des Sciences Physiques 1856, 33:137.* Nach S.G.Brush (Fußnote 24), 167. E.Verdet, "Principe d'une nouvelle théorie des gaz", *Annales de Chimie, 1857, 50:491-497*; sowie ein Artikel ohne Angabe des Autors, der auch die folgende Arbeit von Clausius in die Kommentierung einbezog: *Il Nuovo Cimento 1857, 6:435-441.* Nach C.Truesdell (Fußnote 1), 20.
- ³¹ R.Clausius, "Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen", *Annalen der Physik, 1850, 79:368-397 u.500-524, hier:372.*
- ³² R.Clausius, "Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen", *Annalen der Physik, 1857, 100:353-380, hier:353.*
- ³³ Ebd.
- ³⁴ Ebd.; auch in "Ueber die Wärmeleitung gasförmiger Körper", *Annalen der Physik, 1862, 115:1-56, hier:1; Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie, Braunschweig 1864, Vorrede VI.*
- ³⁵ A.W.Hofmann, *Zur Erinnerung an vorangegangene Freunde. Gesammelte Gedächtnisreden, Band 1, Braunschweig 1888, 183.*
- ³⁶ Davon berichtete G.Magnus in einem Brief an A.v.Humboldt vom 1.3.1858, STPK, Nachlaß A.v.Humboldt K8, Nr.15.
- ³⁷ E.Clapeyron, "Ueber die bewegende Kraft der Wärme", *Annalen der Physik, 1843, 59:446-451 u.566-586*; Original: "Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur", *Journal de l'Ecole Polytechnique 1834, 14:153-190.*
- ³⁸ S.Carnot, *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propres à développer cette Puissance, Paris 1824.*
- ³⁹ Auch Thomson konnte sich Carnots Arbeit nicht verschaffen und erhielt seine Informationen darüber durch Clapeyron. Laut W.Ostwald in seinen Anmerkungen zur deutschen Übersetzung in Ostwalds Klassiker Nr.37, Leipzig 1909, 69.
- ⁴⁰ R.Clausius (Fußnote 31).
- ⁴¹ Ebd., 503; Planck kommentiert diese Passage in dem von ihm herausgegebenen Nachdruck von Clausius' Arbeit in Ostwalds Klassiker Nr.99, Leipzig 1921, 55.
- ⁴² Ebd., 392.
- ⁴³ H.Helmholtz, *Ueber die Erhaltung der Kraft, Berlin 1847, 31.*
- ⁴⁴ G.Ronge, "Die Züricher Jahre des Physikers Rudolf Clausius", *Gesnerus, 1955, 12:73-108, hier:77.*

- ⁴⁵ *De iis atmosphaerae particulis quibus lumen reflectitur*, Halle 1847. Nach E.Garber, "Rudolph Clausius' Work in Meteorologic Optics", *RETE*, 1974, 2:323-337, hier:337. Es ist unbekannt, weshalb er nicht in Berlin promovierte.
- ⁴⁶ R.Clausius, "Ueber die Lichtzerstreuung in der Atmosphäre, und über die Intensität des durch die Atmosphäre reflectirten Sonnenlichts", *Annalen der Physik*, 1847, 72:294-314; "Ueber die blaue Farbe des Himmels und die Morgen- und Abendröthe", *Annalen der Physik*, 1849, 76:188-195.
- ⁴⁷ R.Clausius, "Uebersichtliche Darstellung der in das Gebiet der meteorologischen Optik gehörenden Erscheinungen", *Grunerts Meteorologische Optik*, 1850, I:367-462.
- ⁴⁸ Während seines Studiums besuchte er viele mathematische Kollegien. Davon zeugen die Mitschriften, die er von den Veranstaltungen der Mathematiker Dirichlet, Dirksen, Minding, Ohm und Steiner angefertigt hat. Sammlung des Deutschen Museums, München.
- ⁴⁹ R.Clausius, "Ueber die Lichtzerstreuung...", (Fußnote 46), 294-295.
- ⁵⁰ Das gab Anlaß zu Kontroversen, die F.Rosenberger mit den Worten zusammenfaßte: "Die Entstehung solcher Dampfbläschen schien den neueren Physikern schwerer zu erklären als die Himmelsbläue selbst...". F.Rosenberger, *Die Geschichte der Physik*, Band III: *Die Geschichte in den letzten hundert Jahren*, Braunschweig 1890, 493.
- ⁵¹ Clausius erwähnte dies in einem Brief an A.v.Humboldt vom 11.3.1850, STPK, Nachlaß A.v.Humboldt, K12, Nr.37.
- ⁵² I.Schneider, "Clausius' erste Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung im Rahmen der atmosphärischen Lichtstreuung", *Archive for History of Exact Sciences*, 1974, 14:143-158.
- ⁵³ R.Clausius, "Ueber die Veränderungen welche in den bisher gebräuchlichen Formeln für das Gleichgewicht und die Bewegung elastischer fester Körper durch neuere Beobachtungen nothwendig geworden sind", *Annalen der Physik*, 1849, 76:46-67.
- ⁵⁴ Zu Wertheims Arbeiten über Elastizität s. F.Rosenberger (Fußnote 50), 462.
- ⁵⁵ R.Clausius (Fußnote 53), 57.
- ⁵⁶ Ebd., 51 u. 65-66.
- ⁵⁷ Protokoll über den Habilitationsvortrag und das anschließende Kolloquium vom 12.12.1850, STPK, Sammlung Darmstaedter, Dove Flf 1840, Bl.30.

- ⁶⁰ Brief von R.Clausius an das Kultusministerium vom 25.7.1849, STPK, Sammlung Darmstaedter, Clausius F1d 1868, Bl.49. Darin bewarb er sich außerdem um ein Lehramt an der Universität Breslau. Es ist unbekannt, ob die Hoffnung auf eine solche Position vor der Habilitation überhaupt realistisch sein konnte.
- ⁶¹ Es handelte sich um die Habilitationen von Knoblauch (31.5.1848), Beetz (24.6.1848) und G.Wiedemann (7.12.1850). Diese Informationen stammen aus den Gutachten von Magnus, STPK, Sammlung Darmstaedter, Magnus F2d 1835(1), Bl.34-40.
- ⁶² Brief von R.Clausius (Fußnote 58).
- ⁶³ Ebd.
- ⁶⁴ K.Biermann, *Die Mathematik und ihre Dozenten an der Berliner Universität 1810-1920*, Berlin 1973, 32.
- ⁶⁵ Ebd., 40.
- ⁶⁶ Ebd., 238-239 u.247.
- ⁶⁷ Gutachten von J.Encke vom 20.11.1850, STPK, Sammlung Darmstaedter, Encke J 1824, nicht numeriert.
- ⁶⁸ Ebd.
- ⁶⁹ Ebd.
- ⁷⁰ Ebd.
- ⁷¹ C.Jungnickel u.R.McCormmach (Fußnote 5), 254.
- ⁷² Kurze Erwähnung in den Lebenserinnerungen eines damaligen Studenten: G.Schubring, "Die Erinnerungen von Karl Emil Gruhl (1833-1917) an sein Studium der Mathematik und Physik in Berlin (1853-1856)", *Jahrbuch Überblicke Mathematik 1985*, Mannheim 1985, 143-173, hier:156.
- ⁷³ Ebd., 158.
- ⁷⁴ Bericht von P.Jolly vom 24.7.1854, Universitätsarchiv Heidelberg, Akten der Phil.Fak. 1854, III 5a, Nr.80. Den Hinweis auf diese Quelle entnahm ich K.M.Olesko, *The Emergence of Theoretical Physics in Germany: Franz Neumann and the Königsberg School of Physics, 1830-1890*, Dissertation Cornell University 1980, 467. Diese Einschätzung teilte auch Bunsen, C.Jungnickel u. R.McCormmach (Fußnote 5), 198. Ähnliche Ansichten vertrat die Bonner Fakultät im Juli 1868. Dennoch erhielt Clausius den Ruf nach Bonn, ebd.,244-245.
- ⁷⁵ Aussage von G.Quincke, zitiert von W.König in: "Georg Hermann Quinckes Leben und Schaffen", *Die Naturwissenschaften*, 1924, 12:621-627, hier:626.
- ⁷⁶ C.Jungnickel u. R.McCormmach (Fußnote 5), 187.
- ⁷⁷ Ebd., 189.

- 76 G.Ronge (Fußnote 44), 81.
- 77 R.Clausius, "Bericht über die zur Preisbewerbung eingesandte Arbeit: 'Recherches expérimentales sur la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur von Hrn. G.A.Hirn in Logelbach bei Colmar'", *Fortschritte der Physik für 1855, 1858*, 11:XIV-XXVIII.
- 78 G.Ronge (Fußnote 44), 92.
- 79 R.Clausius, "Ueber das Wesen der Wärme, verglichen mit Licht und Schall", *Monatsschrift des Wissenschaftlichen Vereins in Zürich*, 1857, 2:73-99.
- 80 R.Clausius (Fußnote 32); diese Arbeit wird u.a. behandelt in: G.Ronge (Fußnote 44), 86-90; I.Schneider (Fußnote 24), 247-248; C.Truesdell (Fußnote 1) 22-25; S.G.Brush (Fußnote 24), 171-175.
- 81 R.Clausius (Fußnote 32), 354.
- 82 Im Text William Siemens genannt, ebd.
- 83 Es handelte sich um: J.P.Joule, "Some remarks on heat and on the constitution of elastic fluids", zuerst erschienen in *Mem. Manchester Lit. Phil. Soc.*, 1848, 9:107-114; mit geringfügigen Ergänzungen nochmals abgedruckt in: *Philosophical Magazine*, 1857, 14:211-216.
- 84 Dazu I.Schneider (Fußnote 24), 247-248.
- 85 R.Clausius lieferte später noch einen Beweis für die Unabhängigkeit von der Gefäßform. Er fügte ihn dem Nachdruck dieser Arbeit als Anmerkung bei: *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie*, Band 2, Braunschweig: Vieweg 1867, 251-254.
- 86 R.Clausius (Fußnote 32), 355.
- 87 Es war deshalb zu einer Kontroverse mit C.Holtzmann gekommen: C.Holtzmann, "Ueber die bewegende Kraft der Wärme", *Annalen der Physik*, 1851, 82:445-452; R.Clausius, "Erwiderung auf die im Märzheft d. Annalen enthaltenen Bemerkungen des Hrn. C.Holtzmann (über die bewegende Kraft der Wärme)", *Annalen der Physik*, 1851, 83:118-125.
- 88 R.Clausius, *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie*, Braunschweig: Vieweg 1864, Band 1, 44; *Die mechanische Wärmetheorie*, Braunschweig: Vieweg 1876, Band 1, 50 u.361-362.
- 89 Er betonte seine Priorität für diese Art der Erklärung noch 1866 in einer Anmerkung: *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie*, Band 2, Braunschweig 1867, 237-238.
- 90 Er gestand das in der ausführlichen Fußnote einer folgenden Arbeit ein: "Ueber die Natur des Ozons", *Annalen der Physik*, 1858, 103:644-652, hier:645.
- 91 z.B. B.Witzschel, "Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. Nach Clausius und Krönig", *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 1857, 2:170-187.

- ⁹² "Daniel Bernoulli's Ansicht über die Constitution der Gase", *Annalen der Physik*, 1859, 107:490-494 ; Paul du Bois-Reymond berichtete in der kleingedruckten Einleitung: "Die neueren Untersuchungen über die Molecularconstitution der Gase haben ein so allgemeines Interesse erregt, daß die Leser dieser Annalen wohl gern über diesen Gegenstand die Ansichten eines großen Physikers des vorigen Jahrhunderts kennen lernen".
- ⁹³ Auf die Verwendung einer solchen Traditionslinie in einer Arbeit Maxwells macht I.Schneider aufmerksam (Fußnote 24), 257.
- ⁹⁴ R.Clausius (Fußnote 90).
- ⁹⁵ Vermutlich C.F.Schönbein, "On the various conditions of oxygen", *Philosophical Magazine*, 1858, 15:24-27.
- ⁹⁶ Brief von R.Clausius an P.T.Riess vom 23.5.1858, STPK, Sammlung Darmstaedter, Clausius Fld 1868(1), Bl.35.

Abschnitt 1.3

- ¹ Buys-Ballot erwähnte einen solchen Briefwechsel in: "Wesen der Electricität und Wärme", *Amtlicher Bericht über die 33. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Bonn im September 1857*, Bonn 1859, 164-167, hier:164, und in "Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme und Electricität nennen", *Annalen der Physik*, 1858, 103:240-259, hier:240.
- ² H.L.Burstyn, "Buys-Ballot", *Dictionary of Scientific Biography*, New York 1970, 2:628.
- ³ Buys-Ballot erwähnte, daß er dieses Thema 1846 in einer Vorlesung über theoretische Chemie behandelt hatte. *Amtlicher Bericht...* (Fußnote 1), 164.
- ⁴ Laut Aussage von Buys-Ballot in "Ueber die Art...", (Fußnote 1), 240.
- ⁵ Buys-Ballot, *Amtlicher Bericht ...* (Fußnote 1).
- ⁶ Buys-Ballot, "Ueber die Art..." (Fußnote 1).
- ⁷ Buys-Ballot, "Schets eener physiologie van het onbewerktuigde ryk der Natur". Autoreferat unter gleichem Titel in: *Fortschritte der Physik für 1849*, 1853, 5:4-16.
- ⁸ So die Antwort von Clausius in: "Ueber die mittlere Länge der Wege, welche bei der Molecularbewegung gasförmiger Körper von den einzelnen Molekülen zurückgelegt werden, nebst einigen anderen Bemerkungen über die Mechanische Wärmetheorie", *Annalen der Physik*, 1858, 105:239-258, hier:254.
- ⁹ Vgl. E.Jochmann in seiner Besprechung in *Fortschritte der Physik für 1858*, 1860, 14:319-322.
- ¹⁰ Ein kurzer biographischer Abschnitt zu Hoppe findet sich in K.Biermann, *Die Mathematik und ihre Dozenten an der Berliner Universität 1810-1920*, Berlin 1973, 64-66.
- ¹¹ R.Hoppe, "Ueber Bewegung und Beschaffenheit der Atome", *Annalen der Physik*, 1858, 104:279-292.
- ¹² R.Hoppe, "Ueber das Wesen der Wärme als Äquivalent der Arbeit", *Annalen der Physik*, 1856, 97:30-34.
- ¹³ R.Clausius, "Notiz über den Zusammenhang zwischen dem Satz von der Aequivalenz der Wärme und Arbeit und dem Verhalten der Gase", *Annalen der Physik*, 1856, 98:173-178.
- ¹⁴ R.Hoppe, "Bemerkung zu den Aufsätzen Bd.98, S.77 und Bd.99, S.562, und Erwiderung auf die Notiz Bd.98, S.173, betreffend die Wärmetheorie", *Annalen der Physik*, 1857, 101:143-147.

- ¹⁵ Hoppe benutzte durchwegs die Bezeichnung "Atome", meinte aber das gleiche wie Clausius, der den Begriff "Moleküle" verwendete. Für eine einheitliche Terminologie wurde hier "Moleküle" gewählt.
Die Berechnung führte er mit $\frac{1}{2}v^2 = p / \{ \rho (c_p / c_v - 1) \}$ durch, wobei ρ die Dichte ist. Diese Formel ergibt sich aus (1.2.6), wenn $H = \frac{1}{2}nmv^2$.
- ¹⁶ "... die Langsamkeit der Wärmeleitung in der Luft, wenn sie von oben nach unten fortschreitet." (Fußnote 11), 282. Hoppe unterschied hier offenbar nicht zwischen dem Leitungsvorgang und der Konvektion. Vor 1860 gab es noch keinen experimentellen Nachweis einer Wärmeleitung in Gasen. (Vgl. Abschnitt 3.1).
- ¹⁷ Dazu I.Schneider, "Rudolph Clausius' Beitrag zur Einführung wahrscheinlichkeits-theoretischer Methoden in der Physik der Gase nach 1856", *Archive for History of Exact Sciences*, 1975, 14:237-261, hier:249-250.
- ¹⁸ R.Hoppe (Fußnote 11), 284.
- ¹⁹ R.Clausius (Fußnote 8).
- ²⁰ R.Clausius, "Ueber die Molecularbewegungen in gasförmigen Körpern", *Amtlicher Bericht über die 34.Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Karlsruhe im September 1858*, Karlsruhe 1859, 152-153.
- ²¹ Clausius wies in seiner Arbeit auf diese Untersuchung hin: (Fußnote 8), 256.
- ²² Ebd., 243.
- ²³ Maxwell erhielt aufgrund einer anderen Voraussetzung den Faktor $1/\sqrt{2}$. Clausius kritisierte das und sandte die in seiner Veröffentlichung nicht enthaltene Berechnung des Faktors $3/4$ am 25.4.1860 in Form eines Leserbriefs an das *Philosophical Magazine*: "On the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine*, 1860, 19:434-436.
Clausius fügte diese Rechnung 1866 in einer ausführlichen Fußnote dem Nachdruck seiner Arbeit bei: *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie*, Band 2, Braunschweig 1867, 265-267.
W.D.Niven, der Herausgeber der Gesamtausgabe der Arbeiten Maxwells, skizzierte die Rechnung von Clausius in einer Fußnote zu dem Nachdruck von: J.C.Maxwell, "Illustrations of the Dynamical Theory of Gases", *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge 1890, Nachdruck Paris 1927, Band 1, 377-409, hier:387.
- ²⁴ R.Clausius, "Ueber die Lichtzerstreuung in der Atmosphäre, und über die Intensität des durch die Atmosphäre reflectirten Sonnenlichts", *Annalen der Physik*, 1847, 72:294-314, hier:299-300.
- ²⁵ R.Clausius (Fußnote 8), 250.
- ²⁶ Darauf wies bereits I.Schneider hin: (Fußnote 17), 249.
- ²⁷ E.Jochmann, *Beiträge zur Theorie der Gase*, Berlin 1859.

- ²⁶ Jochmann schrieb, er komme mit der Veröffentlichung in den Annalen "einer Aufforderung des Hrn. Clausius nach". "Ueber die Molecularconstitution der Gase", *Annalen der Physik*, 1859, 108:153-162, hier:153.
- ²⁹ Jochmann erwähnte dieses Problem in den Annalen nicht mehr. Nur in: (Fußnote 27), 33.
- ³⁰ R.Clausius, "Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen", *Annalen der Physik*, 1857, 100:353-380, hier:366-367.
- ³¹ E.Jochmann (Fußnote 28), 157-158; ebenfalls in seiner Besprechung der Arbeit von Clausius (Fußnote 30) in *Fortschritte der Physik für 1857*, 1859, 13:286-287.
- ³² H.Helmholtz in seiner Besprechung von Krönigs Arbeit in *Fortschritte der Physik für 1856*, 1859, 12:352-354, hier:354.
- ³³ E.Jochmann (Fußnote 28), 161.
- ³⁴ R.Hoppe, "Erwiderung auf einen Artikel von Clausius, nebst einer Bemerkung zur Erklärung der Erdwärme", *Annalen der Physik*, 1860, 110:598-612.
- ³⁵ R.Clausius, "Ueber die Wärmeleitung gasförmiger Körper", *Annalen der Physik*, 1862, 115:1-56.
- ³⁶ J.C.Maxwell, "Illustrations of the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine*, 1860, 19:19-32; 20:21-37; *The Scientific Papers* (Fußnote 23), 377-409.
- ³⁷ Ebd., 383-384.
- ³⁸ J.Stefan, "Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in gasförmigen Körpern", *Annalen der Physik*, 1863, 118:494-496.
- ³⁹ E.Jochmann in seiner Besprechung der Arbeit von Clausius (Fußnote 35) in *Fortschritte der Physik für 1862*, 1864, 18:316-320, hier:319-320.
- ⁴⁰ L.Natanson, "Ueber die Wärmeerscheinungen bei der Ausdehnung der Gase", *Annalen der Physik*, 1889, 37:341-352; Clausius war bei der makroskopisch qualitativen Erklärung stehengeblieben: *Die Mechanische Wärmetheorie*, Braunschweig: Vieweg 1876, Band 1, 227-228.
- ⁴¹ R.Clausius, "Ueber Molecularbewegungen in gasförmigen Körpern", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1863, 46:402-404. Dabei handelte es sich um eine Erwiderung auf K.Puschl, "Über den Wärmezustand der Gase", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1862, 45:357-384. Dieser beharrte auf der Meinung, daß die von einem Teilchen mit der Masse m und der Geschwindigkeit v getroffene Wand nur den Impuls mv und nicht $2mv$ erhielte.

Abschnitt 2.1

- ¹ *Philosophical Magazine*, 1859, 17:81-91; auf die Unvollständigkeit der Übersetzung wurde bereits auf S.32 hingewiesen.
- ² Zur Naturphilosophie rechnete Maxwell die Mechanik und die aus den Gebieten Licht, Wärme, Elektrizität und Magnetismus bestehende Physik. Maxwell in "Lecture at King's College London 1860", Cambridge University Library, Maxwell manuscripts, box 2; abgedruckt in: E.Garber, S.G.Brush u. C.W.F.Everitt, *Maxwell on Molecules and Gases*, Cambridge Mass.: MIT Press 1986, 68-79, hier:69.
- ³ Zu den biographischen Daten Maxwells aus dieser Zeit vgl. z.B. C.W.F.Everitt, *James Clerk Maxwell*, New York: Charles Scribner's Sons 1974, 56.
- ⁴ Maxwell berichtete, daß der Aufsatz von Clausius sein Interesse erweckt hatte. Brief von J.C Maxwell an G.G.Stokes vom 30.5.1859, abgedruckt in: J.Larmor, *Memoir and Scientific Correspondence of the Late Sir George Gabriel Stokes*, Cambridge 1907, Band 2, 8-11; ebenfalls in: E.Garber et al. (Fußnote 2), 277-281.
- ⁵ J.C.Maxwell, "Lecture at King's College", (Fußnote 2), 71-72.
- ⁶ Brief von J.C Maxwell (Fußnote 4).
- ⁷ J.C.Maxwell erwähnte dies in seinem Brief (Fußnote 4), 279.
- ⁸ Aus G.G.Stokes, "On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums", (gelesen am 9.12.1850 vor der Cambridge Philosophical Society, laut Angabe auf der Titelseite), *Mathematical and Physical Papers*, Band 3, Nachdruck London und New York: Johnson 1966, 1-141, hier:81.
- ⁹ Brief von J.C.Maxwell (Fußnote 4), 279.
- ¹⁰ Ebd.
- ¹¹ Ebd.
- ¹² J.C.Maxwell, "Lecture at King's College", (Fußnote 2), 70. Dieses Zitat verwenden auch M.A.El'yashevich u. T.S.Prot'ko, "Maxwell's contribution to the development of molecular physics and statistical methods", *Sov.Phys.Usp.*, 1981, 24:876-903, hier:883.
- ¹³ Maxwells persönlicher Kontakt zu Stokes macht es wahrscheinlich, daß er dessen Arbeiten zu dieser Thematik kannte. Ein konkretes Beispiel dafür ist (Fußnote 8).
- ¹⁴ J.C.Maxwell, "On the Dynamical Theory of Gases", *Report of the 29th Meeting of the British Association for the Advancement of Science*, Notices and Abstracts, Aberdeen September 1859, 9. Auf die dort angekündigte Erklärung der für die Theorie problematischen Schallausbreitung kam er nie zurück.

- ¹⁵ Brief von J.C.Maxwell an G.G.Stokes vom 8.10.1859, abgedruckt in: J.Larmor (Fußnote 4), Band 2, 11; ebenfalls in: E.Garber et al. (Fußnote 2), 282-283.
- ¹⁶ J.C.Maxwell, "Illustrations of the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine* 1860, 19, 19-32; 20, 21-37. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge 1890, Nachdruck Paris 1927, Band 1, 377-409.
- ¹⁷ Die Zwischenschritte zu den Berechnungen des ersten Kapitels führt I.B.Hopley in seiner Dissertation aus: *Clerk Maxwell's contributions to physics*, University of London 1956, 120-163. Den Hinweis darauf verdanke ich I.Schneider, "Rudolph Clausius' Beitrag zur Einführung wahrscheinlichkeits-theoretischer Methoden in der Physik der Gase nach 1856", *Archive for History of Exact Sciences*, 1975, 14:237-261, hier:256.
- ¹⁸ I.Schneider (Fußnote 17), 258-259.
- ¹⁹ In einem Abriß der Entwicklung der kinetischen Gastheorie, den er 1871 für W.Thomson schrieb, wiederholte Maxwell diese Aussage. In H.T.Bernstein, "J.Clerk Maxwell on the History of the Kinetic Theory of Gases, 1871", *Isis*, 1963, 54:206-216, hier:211. S.G.Brush weist auf Maxwells Fehler hin: *The Kind of Motion We Call Heat*, Band 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*. Amsterdam und New York: North-Holland 1976, 344. C.Truesdell erwähnt, Maxwell hätte später zugegeben, daß der Beweis nicht überzeugend sei. Eine Quelle nennt er jedoch nicht: "Early Kinetic Theories of Gases", *Archive for History of Exact Sciences*, 1975, 15:1-66, hier:52.
- ²⁰ I.B.Hopley (Fußnote 17), 145.
- ²¹ Ebd., 153.
- ²² J.C.Maxwell (Fußnote 16), 391.
- ²³ Stokes erwähnte diesen Versuch in (Fußnote 8), 2-3.
- ²⁴ Stokes widmete der Diskussion der Experimente von Baily, Bessel, Coulomb und Dubuat ein ganzes Kapitel: (Fußnote 8), 76-123. Durch Maxwells Arbeit stellte sich die Annahme von einer zur Dichte proportionalen Reibung als unrichtig heraus. Stokes fügte deshalb dem Nachdruck seiner Veröffentlichung von 1901 eine Fußnote und einen kurzen Anhang bei. Darin kommentierte er die von einer falschen Voraussetzung ausgehende gegenseitige Bestätigung von Theorie und Experiment. (Fußnote 8), 76-77 u. 137-141.
- ²⁵ Damals meinte Maxwell noch, daß er einen Dämpfer brauche, um die Dinge nicht zu positiv zu sehen. Brief von J.C.Maxwell (Fußnote 4), 280.
- ²⁶ J.C.Maxwell, "On the Results of Bernoulli's Theory of Gases as Applied to Their Internal Friction, Their Diffusion, and Their Conductivity for Heat", *Report of the 30th Meeting of the British Association for the Advancement of Science*, Notices and Abstracts, Oxford June and July 1860, 15-16.

- ²⁷ R.Clausius, "Ueber die Wärmeleitung gasförmiger Körper", *Annalen der Physik*, 1862, 115:1-56, hier:47-48.
- ²⁸ Clausius erhielt $= 5/12 (\beta l v p/T)$, ebd., 47. Maxwell entwickelte daraufhin eine verbesserte Theorie, die er jedoch nicht veröffentlichte: "On the Conduction of Heat in Gases", Cambridge University Library, Maxwell manuscripts; abgedruckt in: E.Garber et al. (Fußnote 2), 339-349. Dazu auch E.Garber, "Clausius and Maxwell's Kinetic Theory of Gases", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1970, 2:299-319, hier: 311-314.
- ²⁹ Maxwell gab nicht an, welches Gas er meinte. Vermutlich bezog er sich auf Luft.
- ³⁰ Im Original: "This Result of the dynamical theory, being at variance with experiment, overturns the whole hypothesis, however satisfactory the other results may be." (Fußnote 26), 16.
- ³¹ Brief von J.C.Maxwell an H.R.Droop vom 28.1.1862, abgedruckt in: L.Campbell u. W.Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell*, London 1882, 332; ebenfalls in: E.Garber et al. (Fußnote 2), 336.
- ³² Postkarte von J.C.Maxwell an S.G.Tait vom 29.12.1877, Cambridge University Library, Maxwell manuscripts; abgedruckt in: C.W.F.Everitt (Fußnote 3), 185.

Abschnitt 2.2

- ¹ F.Rosenberger, *Die Geschichte der Physik*, Band III: *Geschichte der Physik in den letzten hundert Jahren*, Braunschweig 1890, 564.
- ² K.Møller Pederson, "Poiseuille", *Dictionary of Scientific Biography*, New York 1975, 11:62-64.
- ³ J.L.Poiseuille, "Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très-petits diamètres", vorgelegt der Académie Royale des Sciences de l'Institut de France in den Sitzungen vom 14.12., 28.12.1840 und 11.1.1841. *Comptes Rendus*, 1841, 11:961-967 u. 1041-1048, 12:112-115. Diese Angaben entnahm ich L.Schiller, *Drei Klassiker der Strömungslehre: Hagen Poiseuille Hagenbach*, Ostwalds Klassiker Nr.237, Leipzig 1933, 89.
- ⁴ "Experimentelle Untersuchungen über die Bewegung der Flüssigkeiten in Röhren von sehr kleinen Durchmesser", *Annalen der Physik*, 1843, 58:424-448.
- ⁵ Ebd., 447-448.
- ⁶ G.Hagen, "Ueber die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Röhren", *Annalen der Physik*, 1839, 46:423-442.
- ⁷ Das geht auf einen Artikel von Ostwald aus dem Jahr 1925 zurück. Nach L.Schiller (Fußnote 3), 82.
- ⁸ So äußerte er sich in "On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids", (gelesen am 14.4.1845 vor der Cambridge Philosophical Society, laut Angabe auf der Titelseite), *Mathematical and Physical Papers*, Band 1, Nachdruck London und New York: Johnson 1966, 75-129, hier:76.
- ⁹ Stokes gab an, von diesen Arbeiten erst später erfahren zu haben. Poisson wurde im Text, Navier in einer Fußnote erwähnt. Ebd., 77.
- ¹⁰ Ebd., 96. Bei diesen Arbeiten handelte es sich um: Bossut, *Traité élémentaire d'hydrodynamique*, Paris 1775; Dubuat, *Principes d'hydraulique, vérifiés par un grand nombre d'expériences*, Paris 1786.
- ¹¹ C.Truesdell in "Preface to the Reprinting", (Fußnote 8), IVF-IVG.
- ¹² G.G.Stokes (Fußnote 8), 104-105.
- ¹³ E.Hagenbach-Bischoff, "Ueber die Bestimmung der Zähigkeit einer Flüssigkeit durch den Ausfluß aus Röhren", *Annalen der Physik*, 1860, 109:385-426.

- ¹⁴ Hagenbach erwähnte die Anleitung durch Wiedemann in dessen Laboratorium, ebd., 398. Die Zähigkeit hatte bereits in einer Arbeit von Wiedemann eine Rolle gespielt: "Ueber die Bewegung der Flüssigkeiten im Kreise der geschlossenen galvanischen Säule und ihre Beziehungen zur Elektrolyse", *Annalen der Physik*, 1856, 99:177-233. Hierin war Hagenbachs Untersuchung schon angekündigt worden. Dazu Bemerkungen von Hagenbach (Fußnote 13), 386 u. 396.
- ¹⁵ Das Schreiben des Erziehungs-Collegiums des Kantons Basel-Stadt vom 28.5.1863 weist auf diese Empfehlung hin, Staatsarchiv des Kantons Basel-Stadt, Erziehungsakten CC 24.
- ¹⁶ Hagenbach benutzte die Bezeichnung "Cohärenzerscheinungen", (Fußnote 13), 385.
- ¹⁷ Ebd., 393.
- ¹⁸ Auch bei L.Schiller (Fußnote 3), 96.
- ¹⁹ Diese Herleitung stammte aus den Vorträgen Franz Neumanns über Hydrodynamik. H.Jacobsen publizierte sie mit dessen Erlaubnis in "Beiträge zur Hämodynamik", *Archiv für Anatomie, Physiologie und Medicin*, 1860. Laut Angabe von L.Schiller (Fußnote 3), 83. Der Abschnitt, der die Rechnung enthält, wird als Zitat bei L.Schiller abgedruckt: (Fußnote 3), 93-95.
- ²⁰ H.Helmholtz und G.v.Piotrowski, "Ueber die Reibung tropfbarer Flüssigkeiten", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1860, 40:607-658.
- ²¹ H.Helmholtz, "Ueber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen", *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1858, 55:25-55.
- ²² Ebd., 25.
- ²³ Brief von Helmholtz an Ludwig vom 13.6.1859, zitiert nach L.Koenigsberger, *Hermann von Helmholtz*, Braunschweig 1902, Band 1, 343.
- ²⁴ Brief von Helmholtz an W.Thomson vom 30.8.1859, zitiert nach L.Koenigsberger, ebd.
- ²⁵ Ebd., 343-345 u. 349.
- ²⁶ Helmholtz schrieb im letzten Summanden irrtümlich $4/r$.
- ²⁷ *J.C.Poggendorff's Biographisch-Literarisches Handwörterbuch*, IV, Leipzig 1904, 1168.
- ²⁸ Laut Piotrowski (Fußnote 20), 614.
- ²⁹ Ebd., 651.
- ³⁰ Ebd., 614.
- ³¹ Ebd., 656.

- ³² C.Jungnickel u. R.McCormmach meinen irrtümlich, allein die Messung der äußeren Reibung wäre das Ziel der Experimente gewesen. *Intellectual Mastery of Nature*, Band 1: *The Torch of Mathematics 1800-1870*, Chicago: The University of Chicago Press 1986, 307.
- ³³ Helmholtz und Piotrowski (Fußnote 20), 652-654.
- ³⁴ L.Graetz berichtet von mehreren Experimenten aus dem Zeitraum 1890 bis 1905. Nur in einem fand man eine Gleitung, die allerdings wesentlich kleiner war als die von Helmholtz und Piotrowski. *Reibung*, in A.Winkelmann, *Handbuch der Physik*, Band I: *Allgemeine Physik*, 2.Auflage Leipzig 1908, 1373-1414, hier:1378.
- ³⁵ W.Wien, *Lehrbuch der Hydrodynamik*, Leipzig: Hirzel 1900, 302.
- ³⁶ L.Graetz (Fußnote 34), 1378.
- ³⁷ R.Ladenburg, "Ueber den Einfluß der Reibung auf die Schwingungen einer mit Flüssigkeit gefüllten Kugel", *Annalen der Physik*, 1908, 27:157-185.
- ³⁸ Vgl. Landau-Lifshitz, *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Band VI: *Hydrodynamik*, 4.Auflage Berlin: Akademie-Verlag 1981, 55.
- ³⁹ Ein Auszug wurde veröffentlicht: "Über die innere Reibung zäher Flüssigkeiten und ihre Abhängigkeit vom Druck", *Annalen der Physik*, 1907, 22:287-309.

Abschnitt 2.3

- ¹ Nach der "Vita" in seiner Dissertation *De Mutua Duorum Fluidorum Frictione*, Regimonti 1860.
- ² Ebd.
- ³ O.E.Meyer, "Ueber die Reibung der Flüssigkeiten", *Annalen der Physik*, 1861, 113:55-86, 193-238, 383-425, hier:56.
- ⁴ Laut Angabe von Meyer, ebd., 57. Schon Kirchhoff wurde in Königsberg für eine Arbeit mit dem doppelten Preisgeld ausgezeichnet. E.Warburg, "Zur Erinnerung an Gustav Kirchhoff", *Die Naturwissenschaften*, 1925, 13:205-212, hier:206.
- ⁵ O.E.Meyer, (Fußnote 1).
- ⁶ Brief von O.E.Meyer an F.Neumann vom 21.11.1861, Archiv der Universität Göttingen, Franz Neumann 53¹¹. Meyer erläuterte hier, weshalb er sich nicht in Königsberg habilitieren wollte.
- ⁷ Ebd.
- ⁸ Brief von O.E.Meyer an F.Neumann vom 6.2.1861, Archiv der Universität Göttingen, Franz Neumann 53¹¹. Meyer berichtete darin ausführlich von den Verhältnissen in Breslau. Auf diese Quelle beziehen sich auch C.Jungnickel u. R.McCormmach in ihrer Darstellung der Physik an der Universität Breslau. *Intellectual Mastery of Nature*, Band 1: *The Torch of Mathematics 1800-1870*, Chicago: The University of Chicago Press 1986, 232.
- ⁹ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 8).
- ¹⁰ Ebd.
- ¹¹ Meyer erkannte erst nachträglich, daß ihm die Höhe eines im Experiment verwendeten Bleirings für seine Berechnungen fehlte. Deshalb bat er Neumann brieflich um die Übermittlung dieses Wertes. Ebd.
- ¹² O.E.Meyer (Fußnote 3), 57-58.
- ¹³ O.E.Meyer, "Ueber die Reibung der Flüssigkeiten", *Journal für reine und angewandte Mathematik*, 1861, 59:229-303.
- ¹⁴ O.E.Meyer (Fußnote 3).
- ¹⁵ Ebd., 61.
- ¹⁶ O.E.Meyer, *Die kinetische Theorie der Gase*, Breslau 1877, VIII.
- ¹⁷ Mit dieser Bezeichnung wurde er von einem Kollegen in Breslau konfrontiert. Brief von O.E.Meyer (Fußnote 8). Das erwähnen auch C.Jungnickel u.R.McCormmach (Fußnote 8), 232.

- ¹⁸ Brief von L.Meyer an O.E.Meyer vom 3.11.1861, zitiert in A.Kistner, "Aus dem Briefwechsel des Physikers Oskar Emil Meyer und des Chemikers Lothar Meyer", *Archiv für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik*, 1913, 6:207-215, hier:211.
- ¹⁹ Brief von L.Meyer an O.E.Meyer vom 12.1.1863, zitiert in A.Kistner, ebd., 211.
- ²⁰ O.E.Meyer (Fußnote 3), 67.
- ²¹ In den Einheiten $\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ lieferten die Messungen von Helmholtz und Piotrowski bei $24,5^\circ\text{C}$ $\mu=0,01406$, während Meyer auf $\mu=0,01035$ kam. Hagenbachs $\mu=0,01355$ bei 10°C stand Meyers $\mu=0,01567$ gegenüber. (Fußnote 3), 419 u.421.
- ²² In den Einheiten $\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ erhielt Meyer für Wasser bei $15,5^\circ\text{C}$ $\mu = 0,0131$ und für Luft bei 18°C $\mu = 0,000360$. O.E.Meyer (Fußnote 3), 384-385.
- ²³ Ebd., 386.
- ²⁴ Ebd.
- ²⁵ J.Stefan, "Über die Bewegung flüssiger Körper", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1862, 46:8-31, 495-519.
- ²⁶ Ebd., 9-10.
- ²⁷ Ebd., 11.
- ²⁸ Brief von O.E.Meyer an F.Neumann vom 6.8.1861, *Archiv der Universität Göttingen*, Franz Neumann 53 11.
- ²⁹ Brief von O.E.Meyer an L.Meyer vom 15.5.1861, zitiert in A.Kistner (Fußnote 18), 209.
- ³⁰ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 8). Hierzu wurde Meyer nach eigener Angabe durch eine Arbeit von G.Wiedemann angeregt: "Ueber die Torsion und die Beziehungen derselben zum Magnetismus", *Annalen der Physik*, 1859, 106:161-201.
- ³¹ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 28).
- ³² Ebd.
- ³³ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 6).
- ³⁴ Briefe von O.E.Meyer an L.Meyer vom 23.9.1861 und 9.11.1861, Brief von L.Meyer an O.E.Meyer vom 4.10.1861, erwähnt in A.Kistner (Fußnote 18), 207.
- ³⁵ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 28).
- ³⁶ Ebd. Dieses Zitat steht auch bei C.Jungnickel u. R.McCormmach (Fußnote 8), 261.
- ³⁷ A.Kistner (Fußnote 18), 207.

- ³⁰ Antrag der Philosophischen Fakultät vom 17.2.1862, Bestätigung des Universitätskuratoriums vom 22.2.1862, Archiv der Universität Göttingen, Az.4 Vc Nr.104.
- ³⁹ Brief von O.E.Meyer an F.Neumann vom 20.2.1863, Archiv der Universität Göttingen, Franz Neumann 53 11.
- ⁴⁰ Ebd.
- ⁴¹ Ebd.
- ⁴² Brief von O.E.Meyer an L.Meyer vom 10.3.1862, zitiert in A.Kistner (Fußnote 18), 213-214.
- ⁴³ So in O.E.Meyers Brief (Fußnote 38). Das ist eigentlich erstaunlich, denn Maxwell wies in der entsprechenden Arbeit ausdrücklich auf die überraschende Druckunabhängigkeit der Reibung hin. Vielleicht kannte Meyer nur die Besprechung von E.Jochmann, wo dieses Ergebnis nicht besonders herausgestellt wurde: *Fortschritte der Physik für 1859, 1861*, 15:314-320.
- ⁴⁴ In seinem Vortrag auf der Naturforscherversammlung am 23.9.1863 zitierte Meyer das Ergebnis von Maxwell dann richtig: "Ueber die innere Reibung der Atmosphärischen Luft", *Amtlicher Bericht über die 38. Naturforscherversammlung in Stettin 1863*, Stettin 1864, 141-144, hier:143.
- ⁴⁵ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 39). Es handelt sich hier um Stokes' Arbeit "On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums", (gelesen am 9.12.1850 vor der Cambridge Philosophical Society, laut Angabe auf der Titelseite), *Mathematical and Physical Papers*, Band 3, Nachdruck London und New York: Johnson 1966, 1-141.
- ⁴⁶ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 39).
- ⁴⁷ Ebd. Spätestens seit September 1862 experimentierte er damit. Eine entsprechend datierte Meßreihe findet sich in "Ueber die innere Reibung der Gase. Erste Abhandlung. Ueber den Einfluß der Luft auf Pendelschwingungen", *Annalen der Physik*, 1865, 125:177-209, 401-420, 564-599, datiert mit April 1865, hier:414. Diese Apparatur wurde 1893 von W.Foerster für die Weltausstellung in Chicago angefordert: Brief von O.E.Meyer an den Dekan der Philosophischen Fakultät der Universität Breslau vom 1.2.1893, STPK, Sammlung Darmstaedter, Meyer F2a 1877(4).
- ⁴⁸ Die Reduktion auf den luftleeren Raum lieferte wesentlich kleinere Zahlen für den Reibungskoeffizienten (vgl.Fußnote 22). Sie lagen zwischen 0,000110 und 0,000115 (in $\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Brief von O.E.Meyer (Fußnote 39) und (Fußnote 44), 143.
- ⁴⁹ O.E.Meyer (Fußnote 44).
- ⁵⁰ Ebd., 143.

- ⁵¹ O.E.Meyer, "Ueber die innere Reibung...", (Fußnote 47), 583. Eine der angegebenen Meßreihen ergab folgende Werte:

Temperatur [°C]	Druck [mm Hg]	Reibungskoeffizient [g cm ⁻¹ s ⁻¹]
22,4	757,5	0,000332
22,3	500,6	0,000307
22,6	251,1	0,000236

Ebd., 578. Diese Tabelle gibt auch S.G.Brush in seiner Erörterung der Arbeiten Meyers an. *The Kind of Motion We Call Heat*, Band 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*. Amsterdam und New York: North-Holland 1976, 435-442, hier:437.

- ⁵² Meyer erhielt folgende Zahlen:

Temperatur [°C]	Druck [mm Hg]	Reibungskoeffizient [g cm ⁻¹ s ⁻¹]
8,3	745,6	0,000333
21,5	756,6	0,000323
34,4	751,5	0,000366

O.E.Meyer, "Ueber die innere Reibung...", (Fußnote 47), 586.

- ⁵³ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 39). Brief von O.E.Meyer an L.Meyer vom 18.5.1862, erwähnt in A.Kistner (Fußnote 18), 208.
- ⁵⁴ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 39). Etwas abschätzig nannte er hierin Hornstein einen praktischen Astronomen. Tatsächlich arbeitete dieser jedoch auch auf theoretischem Gebiet. Dazu A.Aigner, *Das Fach der Mathematik an der Universität Graz*, Graz 1985, 9-10. Anders als Meyer gibt Aigner an, Hornstein sei der erste auf der Berufungsliste gewesen. Ebd., 9. A.Kistner glaubte irrtümlich, daß Meyer von sich aus abgelehnt hätte. (Fußnote 18), 208.
- ⁵⁵ Antrag der Philosophischen Fakultät vom 14.12.1863, Archiv der Universität Göttingen, Az.4 Vc Nr.104.
- ⁵⁶ Diese Stellungnahme W.Webers wird in einer Auskunft des Kultusministeriums vom 2.2.1865 zitiert. Dabei handelte es sich um die Antwort auf eine Anfrage der Württembergischen Regierung, die Meyer für die Besetzung einer Professur in Tübingen in Betracht zog, ebd.
- ⁵⁷ Brief von W.Weber an den Präsidenten des Schweizerischen Schulrats vom 27.5.1867, Archiv der ETH Zürich, 1867/205.
- ⁵⁸ Davon berichtete O.E.Meyer dessen Vater F.Neumann in einem Brief vom 16.7.1864, Archiv der Universität Göttingen, Franz Neumann 53¹¹. Auf diese Quelle beziehen sich auch C.Jungnickel u. R.McCormmach (Fußnote 8), 232-233.
- ⁵⁹ Anfangs glaubte Meyer, die Berufung ginge auf eine Empfehlung von Carl Neumann zurück. Bei seinem Besuch im Berliner Ministerium erfuhr Meyer jedoch, daß Franz Neumann hier seinen Einfluß geltend gemacht hatte. Er bedankte sich in einem Brief an F.Neumann vom 18.10.1864, Archiv der Universität Göttingen, Franz Neumann 53¹¹.

- ⁶⁰ Brief von Schröter an O.E.Meyer vom 9.5.1864, erwähnt in A.Kistner (Fußnote 18), 208.
- ⁶¹ Das meinte Meyer in seinem Brief (Fußnote 58).
- ⁶² Brief von O.E.Meyer an L.Meyer vom 26.6.1864, zitiert in A.Kistner (Fußnote 18), 208. Brief von O.E.Meyer an das Preußische Kultusministerium, undatiert mit einem Eingangsvermerk vom 28.6.1864, STPK, Sammlung Darmstaedter, Meyer F2a 1877(4). Nach seinen zuvor geschilderten negativen Erfahrungen in Breslau erscheint Meyers Rückkehr dorthin etwas über-raschend. Er schrieb Neumann am 18.10.1864, es sei besser Professor in Breslau als Privatdozent in Göttingen zu sein (Fußnote 59). Das ist ein Widerspruch zu seinem Brief vom 16.7.1864, in dem er noch davon berichtete, daß man ihn in Göttingen mit einem Extraordinariat hätte halten wollen (Fußnote 58).
- ⁶³ Brief von O.E.Meyer an Gehring vom 6.8.1864, Universitätsbibliothek Bonn, Handschriftenabteilung.
- ⁶⁴ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 58).
- ⁶⁵ Brief von Schröter an O.E.Meyer vom 3.7.1864, zitiert in A.Kistner (Fußnote 8), 208.
- ⁶⁶ Brief von O.E.Meyer (Fußnote 58). C.Jungnickel u.R.McCormach führen diesen Brief als Beleg dafür an, daß Meyer eine Professur für Mathematik und nicht, wie andere Autoren meinen, für mathematische Physik innehatte (Fußnote 8), 232-233. Meyer war zwar Nachfolger eines Mathematikers, lehrte aber in Absprache mit seinen Kollegen eben auch mathematische Physik. In dem von ihm für die Personalakte geschriebenen Lebenslauf heißt es: "Im Juni 1864 erhielt ich meine Ernennung zum ausserordentlichen Professor an hiesiger Universität für Mathematik und mathematische Physik und trat im October des-selben Jahres mein Amt an." Archiv der Uniwersytet Wroclawski, Personalakte Meyer.
- ⁶⁷ Siehe (Fußnote 56).
- ⁶⁸ Lebenslauf (Fußnote 66). Dazu auch A.Kistner, "Meyer, Oskar Emil", *Biographisches Jahrbuch und Deutscher Nekrolog*, Band 14, 1909, 157-160; Brief von O.E.Meyer an den Kurator der Universität Breslau vom 18.2.1879, STPK, Sammlung Darmstaedter, Meyer F2a 1877(4).
- ⁶⁹ Brief von O.E.Meyer an F.Neumann vom 30.3.1867, Archiv der Universität Göttingen, Franz Neumann 53 ¹¹; vgl. auch C.Jungnickel u. R.McCormach, die sich dabei ebenfalls auf diese Quelle beziehen, (Fußnote 8), 233.
- ⁷⁰ A.Kistner (Fußnote 68), 159.
- ⁷¹ Brief von O.E.Meyer an Wagner vom 28.3.1877, Archiv der Uni-versität Göttingen. Brief von O.E.Meyer an den Kurator ... (Fußnote 68).

- ⁷² O.E.Meyer, "Ueber die innere Reibung der Gase...", (Fußnote 47), 178. Unter der Überschrift zu dieser Arbeit findet sich der etwas mißverständliche Hinweis: "Auf der Naturforscher-Versammlung zu Stettin am 23. September 1863 vorgetragen...". In der Zwischenzeit hatte Meyer aber weitere experimentelle Ergebnisse erhalten und auch seine Kommentierung etwas verändert. S.G.Brush übersieht diesen Aspekt. (Fußnote 51), 435.
- ⁷³ O.E.Meyer (Fußnote 47), 180.
- ⁷⁴ Ebd.
- ⁷⁵ Ebd., 590. Brief von O.E.Meyer (Fußnote 39).
- ⁷⁶ Ebd., 580. Brief von O.E.Meyer (Fußnote 58).
- ⁷⁷ O.E.Meyer, "Ueber die Reibung der Gase. Zweite Abhandlung. Ueber die Strömung der Gase durch Capillarröhren." *Annalen der Physik*, 1866, 127:253-281, 353-382, datiert mit dem 24.11.1865.
- ⁷⁸ T.Graham, "On the motion of gases", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1846, 136:573-632; 1849, 139:349-392.
- ⁷⁹ O.E.Meyer (Fußnote 77), 257.
- ⁸⁰ Meyer fand $\mu = 0,000178 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ebd., 365.
- ⁸¹ Nach Maxwells eigener Bemerkung in: J.C.Maxwell, "The Bakerian Lecture.- On the Viscosity or Internal Friction of Air and other Gases." (Eingereicht am 23.11.1865, gelesen am 8.2.1866, laut Angabe auf der Titelseite.) *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge 1890, Nachdruck Paris 1927, Band 2, 1-25, hier:25 (Postscript vom 7.12.1865).
- ⁸² Brief von J.C.Maxwell an C.H.Cay vom 5.1.1865, abgedruckt in: L.Campbell u. W.Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell*, London 1882, 341-342; ebenfalls in: E.Garber, S.G.Brush, u. C.W.F.Everitt, *Maxwell on Molecules and Gases*, Cambridge Mass.: MIT Press 1986, 349-350.
- ⁸³ Ebd.
- ⁸⁴ Zwischen 0.5 und 30 inch. (Fußnote 81), 10 u. 23.
- ⁸⁵ Das waren die Temperaturen 51°F und 185°F. Außerdem gab es Messungen in dem kleinen Temperaturintervall von 51°F bis 74°F (10,5°C bis 23°C). Ebd., 10-11.
- ⁸⁶ Maxwell gab diese Aussage hier ohne eine weitere Begründung an. Ebd., 11. Die Herleitung folgte dann in: "On the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine*, 1866, 32:390-393; 1868, 35:129-145 u. 185-217.
- ⁸⁷ Brief von J.C.Maxwell an T.Graham vom 1.5.1865, Cambridge University Library, Maxwell manuscripts; abgedruckt in: E.Garber et al. (Fußnote 82), 351-352.

- 88 Brief von J.C.Maxwell an P.G.Tait vom 17.6.1865, Cambridge University Library, Maxwell manuscripts; abgedruckt in: E.Garber et al. (Fußnote 82), 352-353.
Für 18°C erhielt Maxwell $\mu = 0,000200 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Die Diskrepanz zu dem kleineren Wert von Stokes konnte er sich nicht erklären (Fußnote 81), 12. Meyer hatte das bereits 1863 auf die falsche Reduktion der Störungen zurückgeführt (s.S.65).
- 89 O.E.Meyer, "Ueber die innere Reibung der Gase. Dritte Abhandlung. Ueber Maxwell's Methode zur Bestimmung der Luftreibung." *Annalen der Physik*, 1871, 143:14-26, datiert mit dem 5.4.1871.
- 90 Zwei Versuchsreihen Meyers lieferten in $\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$:
 $\mu = 0,000197$ und $\mu = 0,000190$. Demgegenüber ergaben Maxwells Versuche bei 18°C $\mu = 0,000200$. Ebd., 24-25. Dazu auch S.G.Brush (Fußnote 51), 440.
Der heutige Wert für den Reibungskoeffizienten der Luft ist bei 20°C: $\mu = 0,0001819$, nach F.Kohlrausch, *Praktische Physik*, 22.Auflage Stuttgart: Teubner 1968, 25.
- 91 O.E.Meyer, "Ueber die innere Reibung der Gase. Vierte Abhandlung. Die Gültigkeit des Poiseuille'schen Gesetzes für die Transpiration der Gase." *Annalen der Physik*, 1873, 148:1-44, datiert mit August 1872.
- 92 O.E.Meyer, "Ueber die innere Reibung der Gase. Fünfte Abhandlung. Der Einfluß der Temperatur auf die Reibung." *Annalen der Physik*, 1873, 148:203-236, datiert mit dem 9.9.1872.
- 93 Dagegen benützte z.B. J.Puluj eine Ausgleichsgerade: "Ueber die Abhängigkeit der Reibung der Gase von der Temperatur", *Annalen der Physik*, 1877, 1:296-310.
- 94 O.E.Meyer (Fußnote 92), 226. S.G.Brush unterlief hier ein Irrtum, denn er meint, Meyer hätte Messungen nur in dem kleinen Temperaturintervall von 0°C bis 21°C vorgenommen. (Fußnote 51), 440. Das gleiche steht in E.Garber et al. (Fußnote 82), 30.
- 95 Dazu auch ein Brief von Meyer an einen unbekannten Adressaten in Wien (Stefan?) vom 28.6.1872, worin er mitteilte, daß seine Resultate der Temperaturabhängigkeit der Reibung zu keiner Theorie passen. STPK, Sammlung Darmstaedter, Meyer F2a 1877(4).
- 96 O.E.Meyer (Fußnote 92), 205.
- 97 Ebd., 229-230.
- 98 O.E.Meyer auf der Naturforscherversammlung in Breslau am 22.9.1874, *Tageblatt der 47.Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte 1874*, 173-174, hier:174.
- 99 Die von E.Garber et al. gewählte Charakterisierung Meyers als "a true experimentalist" erfaßt seine Bedeutung deshalb nicht (Fußnote 82), 19.

Abschnitt 3.1

- ¹ H.Helmholtz, "Wahlvorschlag für August Kundt" (die Mitgliedschaft in der Berliner Akademie der Wissenschaften betreffend), datiert mit dem 8.2.1888, abgedruckt in: C.Kirsten u. H.-G.Körber (Hrsg.), *Physiker über Physiker*, Band 1, Berlin: Akademie-Verlag 1975, 107-108. M.Planck, "Wahlvorschlag für Emil Warburg", datiert mit dem 30.5.1895, ebd., 131-132.
- ² *De tellurio*, Berolina 1827.
- ³ Davon berichtete G.Magnus in einem Brief an die Philosophische Fakultät der Berliner Universität. Er bat deshalb um die Beschleunigung seines Promotionsverfahrens, da die Überfahrt nach Schweden nur bis Mitte Oktober gefahrlos möglich sei. Das Schreiben ist undatiert, wahrscheinlich Ende August 1827, STPK, Sammlung Darmstaedter, Magnus F2d 1835(1), Bl.30. Die Fakultät akzeptierte die besondere Dringlichkeit: Interne Stellungnahme vom 4.9.1827, UA der HUB Phil.Fak.- Dekanat-Nr.211, Bl.233. Magnus wurde dann am 14.9.1827 promoviert.
- ⁴ W.Ostwald, *Zur Geschichte der Wissenschaft*, II. Jacob Berzelius, Ostwalds Klassiker Nr.267, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1985, 118.
- ⁵ Ebd.
- ⁶ Eine Schilderung der Arbeit im Laboratorium von Berzelius gab Friedrich Wöhler: "Jugend-Erinnerungen eines Chemikers", *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft zu Berlin*, 1875, 8:838-852, hier:839-842.
- ⁷ Eine Edition, die aufgrund von Verlusten nicht ganz vollständig sein konnte, gab E.Hjelt heraus: *Aus Jac. Berzelius und Gustav Magnus Briefwechsel in den Jahren 1828-1847*, Braunschweig: Vieweg 1900.
- ⁸ Brief von G.Magnus an J.Berzelius vom 28.2.1829, abgedruckt ebd., 10-13.
- ⁹ Lebenslauf von Magnus mit einer Auflistung der bislang publizierten Arbeiten. STPK, Sammlung Darmstaedter, Magnus F2d 1835(1), Bl.31. Zu jener Zeit war an der Berliner Universität die kumulative Habilitation vorgesehen. Eine besondere Habilitationsschrift gab es nicht. Darauf wies bereits K.Biermann hin: *Die Mathematik und ihre Dozenten an der Berliner Universität 1810-1920*, Berlin 1973, 9. Dennoch führen mehrere Autoren irrtümlich eine solche Arbeit von Magnus an. So zu finden in den Anmerkungen von C.Kirsten u.H.-G.Körber (Hrsg.), *Physiker über Physiker*, Band 2, Berlin: Akademie-Verlag 1979, 272 und bei G.B.Kauffmann, "Magnus", *Dictionary of Scientific Biography*, New York 1974, 9:18-19.
- ¹⁰ Zulassung zur Habilitation durch die Fakultät vom 15.12.1830 und Protokoll des Habilitationsvortrags vom 28.12.1830, UA der HUB Phil.Fak.- Dekanat-Nr.1201, Bl.79-81.

- ¹¹ Brief von G.Magnus an J.Berzelius vom 12.5.1831, abgedruckt in: E.Hjelt (Fußnote 7), 50-54, hier:53.
- ¹² In dem Brief von G.Magnus an J.Berzelius vom 10.4.1832 wird dies angekündigt, abgedruckt in: E.Hjelt (Fußnote 7), 71-72.
- ¹³ Schilderung des Vorlesungsinhalts nach einem Bericht des Generalmajors von Sontheim über das Studium des Württembergischen Kronprinzen Karl vom 27.8.1841, Hauptstaatsarchiv Stuttgart, E14 BÜ 65. Den Hinweis auf diese Quelle verdanke ich Herrn Privatdozent Dr. G.Zweckbronner, Universität Stuttgart.
- ¹⁴ P.v.Groth, *Lebenserinnerungen*, unveröffentlichtes Manuskript, 42, BSB, Handschriftenabteilung, Grothiana I.
- ¹⁵ Brief von G.Magnus an J.Berzelius vom 11.2.1834, abgedruckt in: E.Hjelt (Fußnote 7), 88-91. A.W.Hofmann und H.Helmholtz erwähnten eine weitere Habilitation für Physik. A.W.Hofmann, *Zur Erinnerung an vorangegangene Freunde. Gesammelte Gedächtnisreden*, Band 1, Braunschweig 1888, nach einem Vortrag vom 14.12.1870, 45-191, hier:54. H.Helmholtz, "Gedächtnisrede auf Gustav Magnus" vom 6.7.1871, abgedruckt in: *Physiker über Physiker*, Band 2 (Fußnote 9), 56-66, hier:57. Diese Aussage läßt sich jedoch anhand der Akten der Berliner Universität nicht bestätigen.
- ¹⁶ Dazu C.Jungnickel u. R.McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, Band 1: *The Torch of Mathematics 1800-1870*, Chicago: The University of Chicago Press 1986, 9-10.
- ¹⁷ Brief von G.Magnus (Fußnote 15), 89.
- ¹⁸ Ebd.
- ¹⁹ Nach einer Schilderung von G.Magnus in einem Brief an das Kultusministerium vom 1.4.1834, STPK, Sammlung Darmstaedter, Magnus F2d 1835(1), Bl.16-17.
- ²⁰ Davon berichtete G.Magnus in seinem Brief an J.Berzelius vom 26.5.1834, abgedruckt in E.Hjelt (Fußnote 7), 94-97, hier:94. C.Jungnickel u. R.McCormmach meinen irrtümlich, Magnus wäre außerdem noch ao.Professor für Physik geworden. (Fußnote 16), 108.
- ²¹ Brief von G.Magnus (Fußnote 20), 95.
- ²² Brief von G.Magnus an J.Berzelius undatiert, abgedruckt in: E.Hjelt (Fußnote 7), 111-113.
- ²³ H.Rose, "Wahlvorschlag für Gustav Magnus", datiert mit dem 22.4.1839, abgedruckt in: *Physiker über Physiker*, Band 2 (Fußnote 9), 55. Die Wahl erfolgte am 27.1.1840. Bei den Arbeiten handelte es sich um: "Ueber die Eigenschaft metallischer Pulver, sich bei der gewöhnlichen Temperatur von selbst in der atmosphärischen Luft zu entzünden", *Annalen der Physik*, 1825, 3:81-88; "Ueber die Weinschwefelsäure, ihren Einfluss auf die Aetherbildung, und über zwei neue Säuren ähnlicher Zusammensetzung", ebd. 1833, 27:367-387;

"Ueber eine neue Verbindung des Jods mit Sauerstoff: die Ueberjodsäure", (gemeinsam mit C.F.Ammermüller) ebd. 1833, 28:514-524; "Ueber die im Blute enthaltenen Gase, Sauerstoff, Stickstoff und Kohlensäure", ebd. 1837, 41:583-606.

- ²⁴ Magnus heiratete am 27.5.1840, A.W.Hofmann (Fußnote 15), 59.
- ²⁵ Briefe von G.Magnus an J.Berzelius vom 14.6. u. 29.10.1840, abgedruckt in E.Hjelt (Fußnote 7), 157-159 u. 164-165. Damit widerspricht Magnus der Aussage von H.Rubens, der den Zeitpunkt des Hauskaufs mit der erst 1842 erfolgten Öffnung des Laboratoriums für Studenten gleichsetzte: "Das physikalische Institut", in M.Lenz, *Geschichte der Königlichen Friedrich Wilhelm Universität zu Berlin*, 1910, Band 3, 278-296, hier:279.
- ²⁶ Brief von G.Magnus an das Kultusministerium vom 26.10.1842, STPK, Sammlung Darmstaedter, Magnus F2d 1835(1), Bl.18.
- ²⁷ W.Erman, *Paul Erman. Ein Berliner Gelehrtenleben 1764-1851*, Berlin 1927, 175.
- ²⁸ P.v.Groth (Fußnote 14), 42.
- ²⁹ W.Erman erwähnt eine dementisprechende Beschwerde A.Ermans vom 9.4.1848, W.Erman (Fußnote 27), 175.
- ³⁰ A.W.Hofmann (Fußnote 15), 182-183.
- ³¹ Es gibt eine kurze Schilderung eines studentischen Teilnehmers: G.Schubring, "Die Erinnerungen von Karl Emil Gruhl(1833-1917) an sein Studium der Mathematik und Physik in Berlin (1853-1856)", *Jahrbuch Überblicke Mathematik 1985*, Mannheim 1985, 143-173, hier:158.
- ³² Angabe von A.W.Hofmann (Fußnote 15), 184.
- ³³ G.Schubring (Fußnote 31), 158.
- ³⁴ Magnus war vermutlich auch durch die seit 1821 von Berzelius verfaßten "Jahresberichte" dazu angeregt worden. G.Wiedemann erwähnte das in einer am 4.1.1896 gehaltenen Ansprache bei dem fünfzigjährigen Stiftungsfest der "Physikalischen Gesellschaft zu Berlin". *Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft*, 1896, 15:32-36, hier:35.
- ³⁵ *Fortschritte der Physik für 1845, 1847, 1, Einleitung.*
- ³⁶ So erklärte Clausius seinen erst 1851 erfolgten Beitritt zu der "Gesellschaft" mit der Rücksichtnahme auf Magnus. Laut H.Helmholtz in einem Nachruf auf Clausius, *Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft*, 1889, 8:1-7, hier: 1-2.
- ³⁷ Brief der Philosophischen Fakultät an das Kultusministerium vom 21.2.1844, UA der HUB Phil.Fak.- Dekanat-Nr.1456, Bl.150; das war offenbar die Reaktion auf ein Schreiben von Dove, in dem dieser von seinen Berufungen Kenntnis gab: Brief von H.W.Dove an die Philosophische Fakultät vom 1.2.1844, STPK, Sammlung Darmstaedter, Dove Flf 1840(1), Bl.28.

- ³⁸ Brief des Ministers Eichhorn an die Philosophische Fakultät vom 10.4.1844, UA der HUB Phil.Fak.- Dekanat-Nr.1456, Bl.154.
- ³⁹ Brief der Philosophischen Fakultät an das Kultusministerium vom 18.7.1844, UA der HUB Phil.Fak.- Dekanat-Nr.1456, Bl.163.
- ⁴⁰ Brief des Ministers Eichhorn an die Philosophische Fakultät vom 21.1.1845, UA der HUB Phil.Fak.- Dekanat-Nr.1456, Bl.174.
- ⁴¹ G.Magnus, "Ueber die Ausdehnung der Gase durch die Wärme", *Annalen der Physik*, 1841, 54, 601-603; 55, 1-26.
- ⁴² W.Ostwald (Hrsg.), *Das Ausdehnungsgesetz der Gase. Abhandlungen von Gay-Lussac, Dalton, Dulong und Petit, Rudberg, Magnus, Regnault*; Ostwald's Klassiker Nr.44, Leipzig: Engelmann 1894.
- ⁴³ G.Magnus, "Ueber die Abweichung der Geschosse", *Annalen der Physik*, 1853, 88:1-28. Dies erschien außerdem als separate Broschüre: 1.Auflage, Berlin 1852 und 2.Auflage, Berlin 1860.
- ⁴⁴ G.Magnus, Ueber die Bewegung der Flüssigkeiten", *Annalen der Physik*, 1850, 80:1-36.
- ⁴⁵ Dazu auch P.Pringsheim, "Gustav Magnus", *Die Naturwissenschaften*, 1925, 13:49-52.
- ⁴⁶ Brief von G.Magnus an J.Berzelius vom 2.11.1831, abgedruckt in: E.Hjelt (Fußnote 7), 62-63, hier:63.
- ⁴⁷ Brief von G.Magnus an A.v.Humboldt vom 1.3.1858, STPK, Nachlaß A.v.Humboldt K8, Nr.15. Einige Andeutungen über die Haltung von Magnus zur Zeit des Erscheinens im Jahr 1847 stehen bei L.Koenigsberger, *Hermann von Helmholtz*, Braunschweig 1902, Band 1, 69-71.
- ⁴⁸ Brief von G.Magnus (Fußnote 47).
- ⁴⁹ W.R.Grove, "On the application of voltaic ignition to lighting mines", *Philosophical Magazine*, 1845, 27:442-446 und "On effect of surrounding media on voltaic ignition", ebd. 1849, 35:114-126; übersetzt in: *Annalen der Physik*, 1849, 78:366-381.
- ⁵⁰ G.Magnus, "Ueber die Verbreitung der Wärme in Gasen", (gelesen in der Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 30.7.1860 und 7.2.1861, laut Angabe auf der Titelseite), *Annalen der Physik*, 1861, 112:497-548.
- ⁵¹ Ebd., 503.
- ⁵² Dazu auch S.G.Brush, *The Kind of Motion We Call Heat*, Band 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*, Amsterdam und New York: North Holland 1976, 486-487.
- ⁵³ Die Zeiten für den Temperaturanstieg von 20°C auf 80°C waren in Minuten: Kohlensäure (CO₂) 4,25; Ammoniak 3,5; atmosphärische Luft 3,5; Wasserstoff 1,0. G.Magnus (Fußnote 50), 502.

- ⁵⁴ Magnus gab relative Werte an, indem er das Ergebnis für den leeren Raum gleich 100 setzte: Atmosphärische Luft 82,0; Sauerstoff 82,0; Wasserstoff 111,1; Kohlensäure (CO_2) 70,0; Kohlenoxydgas (CO) 81,2; Stickoxydul (N_2O) 75,2; Grubengas (Methan) 80,4; Oelbildendes Gas (Äthylen) 76,9; Ammoniak 69,2; Cyan 75,2; Schweflichte Säure (SO_2) 66,6. G.Magnus (Fußnote 50), 511. Diese Tabelle gibt auch F.Rosenberger an. *Die Geschichte der Physik*, Band III: *Die Geschichte in den letzten hundert Jahren*, Braunschweig 1890, 673.
- ⁵⁵ G.Magnus, "Ueber die Polarisation der Wärme von 100°C und die Bewegung bei der Wärmeleitung", *Annalen der Physik*, 1868, 134:45-64, hier:48-49.
- ⁵⁶ Das deckt sich mit dem gegenüber den Studenten häufig gebrauchten Ausspruch: "Man kann nicht vorsichtig genug sein!" Magnus wollte sie wohl ermahnen, sich nicht zu weit von den experimentellen Fakten zu entfernen. So überliefert von seinem Laboratoriumsassistenten P.v.Groth (Fußnote 14), 45-46.
- ⁵⁷ A.W.Hofmann (Fußnote 15), 186.
- ⁵⁸ A.Paalzow erwähnte dies in einer am 4.1.1896 gehaltenen Ansprache bei dem fünfzigjährigen Stiftungsfest der "Physikalischen Gesellschaft zu Berlin". *Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft*, 1896, 15:36-37.
- ⁵⁹ A.W.Hofmann stellte eine Liste mit 14 Autoren und 26 Publikationen zusammen, wobei er sich auf die Auskunft von R.Weber, einem damaligen Assistenten von Magnus, stützte. (Fußnote 15), 189. Sie ist allerdings nicht vollständig. Es fehlt wenigstens der Name von Langberg, den Magnus in einem Bericht über das Institut aus dem Jahr 1860 nannte: A.Guttstadt, *Die naturwissenschaftlichen und medicinischen Staatsanstalten Berlins. Festschrift für die 59.Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte*, Berlin 1886, 140. H.Rubens gab 29 Publikationen an: (Fußnote 25), 280.
- ⁶⁰ A.W.Hofmann (Fußnote 15), 178; H.Rubens (Fußnote 25), 281.
- ⁶¹ A.W.Hofmann gab aufgrund der Auskünfte von A.Kundt 47 Arbeiten an (Fußnote 15), 190-191. H.Rubens bezifferte sie mit 48 (Fußnote 25), 281.
- ⁶² P.v.Groth (Fußnote 14), 42-43. Dagegen behauptete A.W.Hofmann, es hätte sich nun um eine öffentliche Einrichtung gehandelt (Fußnote 15), 178.
- ⁶³ P.v.Groth (Fußnote 14), 43. In diesem Punkt hatte sich im Vergleich zu der Zeit im kleinen Labor nichts verändert. Davon berichteten G.Wiedemann (Fußnote 34), 33 und Paalzow (Fußnote 58), 36. Somit irrte H.Rubens, der glaubte, daß Magnus die Themen vorgegeben hätte (Fußnote 25), 281.

- ⁶⁴ Der Begriff der Schule wurde bereits von G.Wiedemann und A.Paalzow strittig diskutiert: (Fußnote 34), 33 und (Fußnote 58), 36. Irreführend ist in diesem Zusammenhang auch der Text auf der am Haus von Magnus am Kupfergraben 7 angebrachten Tafel, die heute noch erhalten ist: "In diesem Hause/ gründete und leitete/ 1842 bis 1870/ Gustav Magnus/ Das erste Physikalische/ Institut Deutschlands/ ihm/ den Mitarbeitern und Schülern/ A.von Baeyer E.du Bois-Reymond/ R.Clausius P.v.Groth/ H.von Helmholtz G.Kirchhoff/ A.Kundt E.Sarasin J.Tyndall/ E.Warburg/ zum Gedächtnis/ Die Deutsche Physikalische/ Gesellschaft/ 1930". Abgesehen von der Problematik des Begriffs der Schule werden hier Physiker zusammen genannt, von denen einige wie Helmholtz nur wenige Wochen, andere wie Kundt aber mehrere Jahre in diesem Haus gearbeitet hatten.

Abschnitt 3.2

- ¹ Nach der "Vita" in seiner Dissertation *De Lumine Depolarisato*, Berolina 1864; Lebenslauf im Bewerbungsschreiben von A.Kundt an die Polytechnische Schule in Zürich vom 21.6.1867, Archiv der ETH Zürich, 1867/247. Diese Quelle verwenden auch C.Jungnickel u. R.McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, Band 1: *The Torch of Mathematics 1800-1870*, Chicago: The University of Chicago Press 1986, 262.
- ² "Ueber die Untersuchung planparalleler Platten", *Annalen der Physik*, 1863, 120:46-54; "Untersuchungen über Augenmaass und optische Täuschungen", ebd., 118-158. Kundt reichte diese beiden Arbeiten zusammen mit seiner Dissertation für das Promotionsverfahren ein, wobei er zu der letzteren anmerkte, sie ohne Kenntnis einer früheren Abhandlung von Zöllner verfaßt zu haben. Die darin zum Ausdruck kommende Einstellung, auch ohne die Priorität noch Originalität reklamieren zu wollen, kritisierte Dove in seinem Gutachten, STPK, Sammlung Darmstaedter, Dove Flf 1840(1), Bl.29, undatiert, ungefähr März 1864. Kundt korrespondierte mit Zöllner über die unterschiedlichen Ergebnisse: Brief an F.Zöllner vom 27.2.1863, STPK, Sammlung Darmstaedter, Kundt Flb 1870, Bl.27-28.
- ³ *De Lumine Depolarisato* (Fußnote 1). Magnus betonte in seinem Zweitgutachten, daß Kundt völlig selbständig gearbeitet habe. UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.238, Bl.822.
- ⁴ Gutachten von Dove (Fußnote 2). P.v.Groth, ebenfalls ein Student aus dem Laboratorium von Magnus, berichtete im Zusammenhang mit der bei seiner Habilitation in Latein geführten "Disputation" von der erstaunlichen Gewandtheit, die Dove in dieser Sprache besaß. Groth, *Lebenserinnerungen*, unveröffentlichtes Manuskript, 90, BSB, Handschriftenabteilung, Grothiana I. Das Promotionsverfahren von Kundt erwähnt auch A.Kleinert in: "Akademische Disputierschriften aus der Bibliothek Schimank", *Bibliothekswissenschaft Musikbibliothek Soziale Bibliotheksarbeit*, Wiesbaden: Otto Harrassowitz 1982, 77-86, hier:85-86.
- ⁵ Nach P.v.Groth, der in Berlin als erster von der neuen Regelung Gebrauch machte: Groth, *Lebenserinnerungen* (Fußnote 4), 51.
- ⁶ Prüfungsprotokoll, UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.238, Bl.823.
- ⁷ Ebd.
- ⁸ A.Kundt, Lebenslauf (Fußnote 1).
- ⁹ Nach der Schilderung Groths in den *Lebenserinnerungen* (Fußnote 4), 45.
- ¹⁰ A.Kundt, Lebenslauf (Fußnote 1), auch Jungnickel u. McCormmach (Fußnote 1), 264.
- ¹¹ Das könnte mit einem Interesse an der Musik zusammenhängen. Spätestens seit dem Beginn des Jahres 1868 gehörte ein Piano zum Haushalt von Kundt. Gemäß der Kostenaufstellung des Umzugs nach Zürich vom 26.5.1868, Archiv der ETH Zürich, 1868/159.

- ¹² Magnus trug Kundts Ergebnisse auf der Sitzung am 22.5.1865 vor: "Ueber die Mittheilung des Tones longitudinal schwingender Stäbe und Röhren an die umgebende Luft", *Monatsbericht der Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1865, 234-255.
- ¹³ *Tageblatt der 40. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Hannover im September 1865*, Hannover 1866, 110.
- ¹⁴ A.Kundt, "Ueber eine Methode zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Gasen und festen Körpern". Diese Angabe ist in der Aufstellung der von den Mitgliedern der Gesellschaft vorgetragenen Originaluntersuchungen enthalten: *Fortschritte der Physik für 1864*, 1867, 20, XI. Daran erinnerte E.Du Bois-Reymond am 4.7.1889 in seiner Erwiderung auf die Antrittsrede von Kundt vor der Akademie der Wissenschaften, abgedruckt in: C.Kirsten u. H.-G.Körber (Hrsg.), *Physiker über Physiker*, Band 2, Berlin: Akademie-Verlag 1979, 161-163, hier:162.
- ¹⁵ "Ueber die Doppelbrechung des Lichts in tönenden Stäben", *Annalen der Physik*, 1864, 123:541-558; "Ueber eine besondere Art der Bewegung elastischer Körper auf tönenden Röhren und Stäben", *Annalen der Physik*, 1865, 126:513-527.
- ¹⁶ A.Kundt, "Ueber eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen", *Annalen der Physik*, 1866, 127:497-523 , hier:506-507.
- ¹⁷ Bereits Kundt wies auf die starke Abhängigkeit von der Glas-sorte hin, ebd., 521. Deshalb wurde hier auf die Angabe eines Vergleichswertes verzichtet.
- ¹⁸ Darin sahen die Kollegen später das Charakteristikum seiner Forschung. M.Planck sprach von einer Faradayschen Natur, die gern nach neuen Effekten suchte. In M.Planck, "Erinnerungen aus alten Zeiten", *Die Naturwissenschaften*, 1946, 230-235, hier:233. Diese Einschätzung findet sich auch bei R.Stichweh, der Kundt einer "explorativen" Experimentalrichtung zurechnet, die nach Stichweh damals das Komplement zu den reinen Präzisionsmessungen darstellte. R.Stichweh, *Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen Physik in Deutschland 1740-1890*, Frankfurt: Suhrkamp 1984, 239-240.
- ¹⁹ Kundt berichtete von besonderen Schwierigkeiten bei der Erzeugung von Staubfiguren in Wasserstoff (Fußnote 16), 509.
- ²⁰ A.Kundt, "Untersuchungen über die Schallgeschwindigkeit der Luft in Röhren", *Annalen der Physik*, 1868, 135:337-372 u.527-561.
- ²¹ "Bemerkung über den Durchgang der Funken des Inductoriums durch die Flamme", *Annalen der Physik*, 1866, 128:159-160; "Ueber die Erzeugung von Klangfiguren in Orgelpfeifen, und über die Wirkung tönender Luftsäulen auf Flammen", ebd., 337-355 u.496; "Beobachtung der Schwingungsform tönender Platten durch Spiegelung", ebd., 610-613; "Ueber einige Arten der Erzeugung von Tönen durch Flammen", ebd., 614-621.

- ²² Einschließlich der Dissertation. Entsprechend der Publikationsliste des Habilitationsantrags vom 11.2.1867, STPK, Sammlung Darmstaedter, Kundt F1b 1870, Bl.24-25. Sie bestand aus zehn Nummern. Die drei letzten Aufsätze zur Akustik waren in der letzten zusammengefaßt. In einem Fall wurde dieselbe Arbeit in zwei verschiedenen Publikationsorganen doppelt gezählt. Wahrscheinlich ist durch die Berücksichtigung solcher Mehrfachnennungen die von C.Jungnickel u.R.McCormmach angeführte Zahl 14 zustandegekommen (Fußnote 1), 265.
- ²³ Kundt heiratete am 24.5.1866. Nach G.Schwalbe, August Kundt Leben und Wirksamkeit, Einleitung zu Kundts posthum herausgegebenen Vorlesungen über *Experimentalphysik*, Braunschweig: Vieweg 1903, VII-XIII, hier:IX.
- ²⁴ Beschluß der Fakultät, UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.1207, Bl.297.
- ²⁵ Gutachten von Dove vom 3.3.1867, ebd., Bl.298-299.
- ²⁶ Gutachten von Magnus vom 5.3.1867, ebd., Bl.299.
- ²⁷ Protokoll der Habilitationsvorlesung, ebd., Bl.300-301.
- ²⁸ So die Einschätzung von G.Magnus in einem Brief an den Präsidenten des Schweizerischen Schulrats vom 19.5.1867, Archiv der ETH Zürich, 1867/188.
- ²⁹ Briefe von J.Stefan an den Präsidenten des Schweizerischen Schulrats vom 6.4.1867 und 17.5.1867, ebd., 1867/125 u.187. Zu Stefans Situation in Wien vgl. auch C.Jungnickel u. R.McCormmach (Fußnote 1), 206.
- ³⁰ M.-A.Knus, "Christoffel und die Mathematik an der polytechnischen Schule Zürich", in P.L.Butzer/F.Feher (Hrsg.), *E.B.Christoffel*, Basel: Birkhäuser 1981, 33-41, hier:34.
- ³¹ Brief von G.Magnus (Fußnote 28).
- ³² Brief von W.Weber an den Präsidenten des Schweizerischen Schulrats vom 27.5.1867, Archiv der ETH Zürich, 1867/205.
- ³³ Brief von A.Kundt an den Präsidenten des Schweizerischen Schulrats vom 22.6.1867, ebd., 1867/246. Wie aus dem Inhalt hervorgeht, war dies bereits das zweite Schreiben von Kundt. Das erste ließ sich in den vorhandenen Akten nicht auffinden.
- ³⁴ So sah Kundt es im Rückblick selbst, wie er in seiner Antrittsrede vor der Akademie der Wissenschaften am 4.7.1889 ausführte. Abgedruckt in: C.Kirsten u. H.-G.Körber (Fußnote 14), 159-161, hier:161. Nach der Schilderung eines seiner Studenten aus dem Jahr 1873 "wollte Kundt nicht viel von Mathematik wissen." H.Kayser, *Erinnerungen aus meinem Leben*, unveröffentlicht, 1936, 74, Exemplar des Hamburger Instituts für Geschichte der Naturwissenschaften. Die frühen Studien in der mathematischen Physik, die Kundt in seinem Lebenslauf (Fußnote 1) erwähnte, haben seine Arbeitsweise nicht merklich beeinflusst.

C.Jungnickel u. R.McCormmach behaupten im Gegensatz hierzu, gerade Kundt habe theoretisches Gedankengut in das Labor von Magnus hineingetragen (Fußnote 1), 265.

- ³⁵ Urkunde des Schweizerischen Bundesrats vom 9.3.1868, Archiv der ETH Zürich, 1868/70. Die offizielle Annahme durch Kundt lag einem Brief an den Präsidenten des Schweizerischen Schulrats vom 13.3.1868 bei, ebd., 1868/77 (diese Beilage ließ sich in den hier zitierten Akten nicht auffinden). Kundt bestätigte die Zusage nochmals in einem Brief an den Präsidenten des Schulrats vom 9.4.1868, ebd., 1868/71. Eine "definitive Anstellung", womit wahrscheinlich eine unbefristete gemeint war, erfolgte am 22.3.1869. Nach einem Brief von Kundt an den gleichen Adressaten vom 1.5.1869, ebd., 1869/146.
- ³⁶ Eine erste Mitteilung wurde der Berliner Akademie der Wissenschaften am 19.12.1867 vorgetragen, Anmerkung von Kundt in (Fußnote 20), 337. Kundt wies hier auch noch darauf hin, daß der Umzug nach Zürich die ausführlichere Veröffentlichung verzögert habe.
- ³⁷ A.Kundt (Fußnote 16), 509-510.
- ³⁸ A.Kundt (Fußnote 20), 346.
- ³⁹ Ebd., 363.
- ⁴⁰ Ebd., 347.
- ⁴¹ Zusammen mit H.Kiessling, einem weiteren Studenten von Magnus, bearbeitete er den 21.Jahrgang, der die Literatur des Jahres 1865 behandelte. Einige Artikel aus den Gebieten Photometrie und Wärmestrahlung rezensierte er selbst. Die Nachfolger in der Redaktion, Quincke und Schwalbe, beklagten die mangelhaften Vorarbeiten für den nächsten Band. *Fortschritte der Physik für 1866, 1869, Einleitung.*
- ⁴² "Gutachten über die Einrichtung des Faches der Physik am Schweizerischen Polytechnikum 1868" vom 16.5.1868, 20 Seiten in der Handschrift von Kundt, gemeinsam unterzeichnet von Mousson und Kundt, Archiv der ETH Zürich, 1868/145.
- ⁴³ Für das kommende Wintersemester kündigte er am 4.8.1868 eine zweistündige "mathematisch-physikalische" Vorlesung mit dem Titel "Theorie des Lichtes" an, Brief von A.Kundt an den Präsidenten des Schulrats, Archiv der ETH Zürich 1868/225.
- ⁴⁴ Als er kurz vor der Übersiedelung nach Zürich aus den Anstellungsbedingungen erfuhr, daß er auch physikalische Übungen zu leiten habe, war dies für ihn eine freudige Überraschung. Brief von A.Kundt vom 9.4.1868 (Fußnote 35).
- ⁴⁵ "Programm für die praktischen Übungen im physikalischen Laboratorium des eidgen. Polytechnikums in Zürich" vom 1.7.1868, 8 Seiten, Archiv der ETH Zürich 1868/186.
- ⁴⁶ F.Kohlrausch, "Eine Bestimmung der specifischen Wärme der Luft bei constantem Volumen mit dem Metallbarometer", *Annalen der Physik*, 1868, 136:618-625.

- ⁴⁷ Vgl. W.R.Nitske, *The Life of Wilhelm Conrad Röntgen*, The University of Arizona Press 1971, 35-36. In diesem Buch gibt es jedoch keine Quellenangaben.
- ⁴⁸ Röntgen gab an, von Kundt dazu angeregt worden zu sein: "Ueber die Bestimmung des Verhältnisses der specifischen Wärmen der Luft", *Annalen der Physik*, 1870, 141:552-559, hier:552.
- ⁴⁹ W.C.Röntgen, ebd. und "Bestimmung des Verhältnisses der specifischen Wärme bei constantem Druck zu derjenigen bei constantem Volumen für einige Gase", *Annalen der Physik*, 1873, 148:580-624.
- ⁵⁰ Über diese Berufung unterrichtete Kundt den Präsidenten des Schulrats in einem Brief vom 3.9.1869, Archiv der ETH Zürich, 1869/295. Die zuvor von der Fakultät vorgeschlagene Berufung Kirchhoffs hatte das Ministerium wegen dessen angegriffener Gesundheit abgelehnt. Nach M.Reindl, *Lehre und Forschung in Mathematik und Naturwissenschaften, insbesondere Astronomie, an der Universität Würzburg von der Gründung bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts*, Dissertation Würzburg 1965, 39. Eine genaue Quellenangabe fehlt allerdings.
- ⁵¹ Nach Kundts eigener Angabe in einem Brief vom 2.1.1872 an Roggenbach, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.1-4.
- ⁵² Briefe von Kundt an den Präsidenten des Schulrats vom 3.9. und 10.9.1869, Archiv der ETH Zürich, 1869/295 u.302.
- ⁵³ Laut Personalblatt der Universität Straßburg wurde Kundt am 25.3.1870 Professor in Würzburg, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.32.
- ⁵⁴ Vgl. W.Oechsli, *Festschrift zum 50jährigen Bestehen 1855-1905*, Zürich 1905, 183. Zu einer gleichzeitigen Lehrtätigkeit an der Universität, wie sie sein Vorgänger Clausius ausgeübt hatte, kam es nicht, E. Gagliardi, *Die Universität Zürich und ihre Vertreter 1833-1933*, Zürich 1938, 689.
- ⁵⁵ Vgl. M.-A.Knus (Fußnote 30), 34.
- ⁵⁶ Bemerkung von F.W.Kohlrausch in seiner handschriftlichen Chronik "Das Physikalische Institut Würzburg" von 1875, auszugsweise abgedruckt in: M.Reindl (Fußnote 50), 222-239, hier:222.
- ⁵⁷ "Ueber die anomale Dispersion der Körper mit Oberflächenfarben", *Annalen der Physik*, 1871, 142:163-171; "Ueber anomale Dispersion", *Annalen der Physik*, 1872, 145:67-80 u. 164-166.
- ⁵⁸ Stenographische Berichte über die Verhandlungen des Deutschen Reichstages, zitiert nach F.R.Wollmershäuser, "Das mathematische Seminar an der Universität Strassburg 1872-1900", in P.L.Butzer/F.Feher (Hrsg.), *E.B.Christoffel*, Basel: Birkhäuser 1981, 52-70, hier:55-56.
- ⁵⁹ Ebd., 56.

- ⁶⁰ K.v.Meyenn, "Die Reorganisation der Straßburger Universität im Jahre 1872 und Christoffels Berufung auf den mathematischen Lehrstuhl", *Heimatblätter des Kreises Aachen*, 1978, 34/35:68-74, hier:69. Eine Quellenangabe fehlt allerdings.
- ⁶¹ J.E.Craig, *A mission for German Learning: The University of Strasbourg*, Dissertation Stanford 1973, 200-201. Insoweit irrte W.Wollmershäuser, wenn er mit der Bemerkung, daß die Berufsakten erst ab Januar 1872 vorliegen, auf die Unvollständigkeit der Quellen hinweisen wollte (Fußnote 58), 60.
- ⁶² Dieser Brief wurde in den Akten nicht gefunden. Kundt bezog sich in seiner Antwort vom 2.1.1872 darauf (Fußnote 51).
- ⁶³ Brief von G.Magnus an den Minister vom 23.1.1867, erwähnt von H.Rubens, "Das physikalische Institut", in M.Lenz (Hrsg.), *Geschichte der Königlichen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin*, Berlin 1910, Band 3, 278-296, hier:282.
- ⁶⁴ Ebd., 283.
- ⁶⁵ Brief von A.Kundt (Fußnote 51).
- ⁶⁶ Brief von A.Kundt an Roggenbach vom 10.2.1872, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.21-22.
- ⁶⁷ Brief von Kundt an Roggenbach vom 8.1.1872, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.7-10; Kundt erschien die ursprüngliche Zusage durch die spätere Formulierung "wenn Zeit und Mittel es erlauben" zu stark abgeschwächt. Er konnte dann eine Klarstellung in seinem Sinne erreichen: Telegramm von Kundt an Roggenbach vom 4.2., Bl.16; Telegramm von Roggenbach an Delbrück (Staatsminister), undatiert, Bl.17; Telegramm von Delbrück an Roggenbach vom 5.2., Bl.18; Brief von Roggenbach an Kundt vom 5.2., Bl.19; Telegramm von Kundt an Roggenbach vom 8.2., Bl.20; Brief von Kundt an Roggenbach vom 10.2., Bl.21-22.
- ⁶⁸ Brief von A.Kundt an Roggenbach vom 12.3.1872, ebd., Bl.26-27.
- ⁶⁹ Vgl. D.Cahan, "The institutional revolution in German physics, 1865-1914", *HSPS*, 1985, 15:1-65, hier:17 u. 25-33.
- ⁷⁰ Brief von Kundt an Roggenbach vom 10.2.1872, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.21-22.
- ⁷¹ Dies war auch noch einer der wichtigsten Gründe für die Institutsneubauten der folgenden Jahrzehnte. Dazu auch D.Cahan, (Fußnote 69), 41.
- ⁷² Brief von A.Kundt an Roggenbach vom 8.1.1872, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.7-10.
- ⁷³ Telegramm von Christoffel an Roggenbach vom 25.2.1872, abgedruckt in: F.R.Wollmershäuser (Fußnote 58), 60.
- ⁷⁴ Brief von Christoffel an Roggenbach vom 26.2.1872, abgedruckt in: K.v.Meyenn (Fußnote 60), 71-72.
- ⁷⁵ Ebd.

- ⁷⁶ Brief von Kundt an Roggenbach vom 27.2.1872, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.24-25. Teile dieses Zitats finden sich, allerdings ohne Quellenangabe, auch bei K.v.Meyenn, "Christoffel an der Kaiser-Wilhelms-Universität in Straßburg", *Heimatblätter des Kreises Aachen*, 1978:34/35, 75-79, hier:75.
- ⁷⁷ Ebd.
- ⁷⁸ Brief von Roggenbach an Kundt vom 24.2.1872, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.23.
- ⁷⁹ Ebd.; Brief von Roggenbach an Christoffel vom 24.2.1872, auszugsweise zitiert von F.R.Wollmershäuser (Fußnote 58), 60.
- ⁸⁰ Telegramm von Kundt an Roggenbach vom 25.2.1872, abgedruckt in: F.R.Wollmershäuser (Fußnote 58), 60; Brief von Kundt an Roggenbach vom 27.2.1872, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.24-25.
- ⁸¹ Brief von E.Warburg an P.v.Groth vom 24.9.1872, BSB, Handschriftenabteilung, Grothiana X; Groth, *Lebenserinnerungen* (Fußnote 4), 152.
- ⁸² Math.-nat. Fakultät an Kuratorium 13.7.1872, nach F.W.Wollmershäuser (Fußnote 58), 60-61. Die theoretische Physik wurde hier also durch das Bedürfnis des Ordinarius definiert, in der Lehre von den mathematisch aufwendigen Teilen der Physik entlastet zu werden. Eine ganz andere Charakterisierung gab L.Boltzmann mehr als 20 Jahre später, wenn er die Aufgabe dieses neuen Gebietes darin sah "die Grundursachen der Erscheinungen aufzusuchen oder ... die gewonnenen experimentellen Resultate unter einheitlichen Gesichtspunkten zusammenzufassen". Gedenkrede von L.Boltzmann vom 8.12.1895 "Josef Stefan", abgedruckt in: *Populäre Schriften*, Leipzig 1905, gekürzter Nachdruck Braunschweig 1979, 59-66, hier:59.
- ⁸³ Das behauptete Roggenbach. Er akzeptierte Kundts Gehaltsforderung von 3500 Talern jährlich und bezifferte das von Helmholtz mit 3000. Brief von Roggenbach an Kundt vom 13.1.1872, ABR AL 103 paq.104 No.527 Bl.11-12. Das widerspricht der Aussage von E.du Bois-Reymond in dessen Brief an H.Helmholtz vom 12.6.1870. Darin sicherte er ihm in seiner Funktion als Rektor der Berliner Universität ein Gehalt von 4000 Talern zu. Abgedruckt in: L.Koenigsberger, *Hermann von Helmholtz*, Braunschweig 1903, Band 2, 181-182, hier:181.
- ⁸⁴ Brief von Roggenbach (Fußnote 83).
- ⁸⁵ P.v.Groth, *Lebenserinnerungen* (Fußnote 4), 140.

Abschnitt 3.3

- ¹ Nach der "Vita" in seiner Dissertation *De Systematis Corporum Vibrantium*, Berolina 1867; E.Grüneisen, "Emil Warburg zum achtzigsten Geburtstag", *Die Naturwissenschaften*, 1926, 14:203-207, hier:203; J.Franck, "Emil Warburg zum Gedächtnis", *Die Naturwissenschaften*, 1931, 19:993-997, hier:993; F.Paschen, "Gedächtnisrede auf Emil Warburg", gehalten in der Akademie der Wissenschaften am 30.6.1932, abgedruckt in: C.Kirsten u. H.-G.Körber (Hrsg.), *Physiker über Physiker*, Band 2, Berlin: Akademie-Verlag 1979, 185-191, hier:185.
- ² E.Warburg, "Zur Erinnerung an Gustav Kirchhoff", *Die Naturwissenschaften*, 1925, 13:205-212, hier:212.
- ³ E.Warburg, "Vita" (Fußnote 1).
- ⁴ H.Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen, als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Braunschweig: Vieweg 1863.
- ⁵ Warburg zitierte dieses Werk in seiner Dissertation auf Seite 6; er berichtete auch später ganz allgemein von der Bedeutung, die Helmholtz' Schriften für ihn gehabt hätten: Antrittsrede von Warburg vor der Berliner Akademie der Wissenschaften vom 2.7.1896, abgedruckt in: *Physiker über Physiker* (Fußnote 1), Band 2, 183-184, hier:184.
- ⁶ J.Franck (Fußnote 1), 993.
- ⁷ Vgl. L.Koenigsberger, *Hermann von Helmholtz*, Braunschweig: Vieweg 1903, Band 2, 25-28.
- ⁸ Bestellung der Promotionskommission, datiert mit dem 25.1.1867, UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.242, Bl.355.
- ⁹ Gutachten Dove, undatiert, ebd., Bl.356.
- ¹⁰ Gutachten Magnus vom 6.3.1867, ebd.
- ¹¹ Stellungnahme von Weierstraß vom 9.3.1867, ebd., Bl.357.
- ¹² Terminfestsetzung vom 14.3.1867, ebd., Bl.358.
- ¹³ Prüfungsprotokoll, ebd., Bl.359.
- ¹⁴ Ebd.
- ¹⁵ "Ueber tönende Systeme", *Annalen der Physik*, 1869, 136:89-102; "Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in weichen Körpern", ebd., 285-295; "Ueber die Erwärmung fester Körper durch das Tönen", *Annalen der Physik*, 1869, 137:632-640; "Ueber die Dämpfung der Töne fester Körper durch innere Widerstände", *Annalen der Physik*, 1870, 139:89-104; "Ueber den Einfluss tönender Schwingungen auf den Magnetismus des Eisens", ebd., 499-502.

- ¹⁶ Habilitationsantrag, UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.1208, Bl.171.
- ¹⁷ Am 25.2.1870 hielt Magnus seine letzte Vorlesung. Nach A.W.Hofmann, *Zur Erinnerung an vorangegangene Freunde. Gesammelte Gedächtnisreden*, Band 1, Braunschweig 1888, 71.
- ¹⁸ UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.1208, Bl.173.
- ¹⁹ Gutachten Dove, undatiert, ebd., Bl.174-175.
- ²⁰ Ebd.
- ²¹ Gutachten Weierstraß vom 16.4.1870, ebd., Bl.175.
- ²² Protokoll der Habilitationsvorlesung, ebd., Bl.178. Warburg hatte außerdem die Themen "Über die verschiedenen Methoden, elektrische Ströme zu erzeugen" und "Über die Dämpfung der Töne" angeboten, ebd., Bl.176-177.
- ²³ "Ueber den Ausfluss des Quecksilbers aus gläsernen Capillarröhren", *Annalen der Physik*, 1870, 140:367-379, datiert mit dem 5.4.1870. Grüneisen (Fußnote 1), 204, und Franck (Fußnote 1), 903, bringen ebenso wie H.Ramser, "Warburg", *Dictionary of Scientific Biography*, New York 1976, 14:170-172, hier:170 diese Arbeit irrtümlich mit der Habilitation in Zusammenhang.
- ²⁴ Auf diesen Umstand wies Boltzmann in seiner Rezension hin: *Fortschritte der Physik für 1870*, 1875, 26:201-202.
- ²⁵ In einem Brief aus dem Feld in Frankreich vom 1.5.1871 bat Warburg den Rektor der Berliner Universität, beim Kultusminister seine Entlassung aus dem Militärdienst zu beantragen, damit er noch im Juni mit der Vorlesung anfangen könne. STPK, Sammlung Darmstaedter, Warburg Fl. 1880.

Abschnitt 4.1

- ¹ M.Planck, "Persönliche Erinnerungen aus alten Zeiten", *Die Naturwissenschaften*, 1946, 33:230-235, hier:233.
- ² J.Franck, "Emil Warburg zum Gedächtnis", *Die Naturwissenschaften*, 1931, 19:993-997, hier:995-996.
- ³ In einem Brief an Warburg erwähnte Kundt, daß Warburg "die ganze Gleiterei und die Berechnungen für die Wärmeleitung" allein entwickelt habe. Dies wird ohne Quellenangabe bei J.Franck zitiert, ebd., 994.
- ⁴ A.Lehnebach, "Bestimmung des Emissionsvermögens schwarzer Körper mittelst der Eiscalorimetrischen Methode", *Annalen der Physik*, 1874, 151:96-108, hier:99. Die Arbeit ist mit dem 31.7.1872 offensichtlich falsch datiert, denn Warburg hielt sich zu jener Zeit noch in Berlin auf. Vermutlich handelte es sich um den 31.7.1873.
- ⁵ J.Stefan, "Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1872, 65:45-69.
- ⁶ A.Kundt u. E.Warburg, "Ueber Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase". Eine kurze Zusammenfassung wurde der Preußischen Akademie der Wissenschaften am 25.2.1875 vorgelegt. Sie erschien in ihren *Monatsberichten* 1875, 160-173. Die Veröffentlichung in englischer Sprache war eine wörtliche Übersetzung davon: *Philosophical Magazine*, 1875, 50:53-62. Die ausführliche Fassung mit den hier erörterten theoretischen Betrachtungen lag somit nur in deutsch vor: *Annalen der Physik*, 1875, 155:337-366, 525-550 datiert mit April 1875 sowie 156:177-211.
- ⁷ Einige der in ihrer Veröffentlichung aufgeführten Messungen sind mit Daten versehen. Bei der Wärmeleitung ist der 26.5.1874 der früheste angegebene Zeitpunkt, bei der Reibung ist es der 19.6.1874. Ebd., *Annalen der Physik*, 156:201 und 155:548.
- ⁸ Kundt und Warburg zitieren auch beide, ebd., 155:341-342.
- ⁹ Beispielsweise dokumentiert Clausius' ausführliche Ausarbeitung von Maxwells erster Veröffentlichung zur kinetischen Gastheorie den großen Aufwand, der zum Verständnis notwendig war: Handschriftenabteilung des Deutschen Museums, Manuskript Nr.3424, der Anfang ist undatiert, auf Seite 47 vermerkt Clausius den Februar 1872.
- ¹⁰ Das wird heute manchmal als Couette-Strömung bezeichnet.
- ¹¹ Dieses Vorgehen hätte hier mit der Navier-Stokes Gleichung für kompressible Flüssigkeiten begründet werden können.
- ¹² A.Kundt u. E.Warburg (Fußnote 6), *Annalen der Physik*, 155:346.

- ¹³ Einen Kontakt zu Christoffel gab es in dieser Frage vermutlich nicht. Von Seiten Warburgs bestanden auch schon seit der gemeinsamen Zeit in Berlin persönliche Vorbehalte gegen ihn. Brief von Warburg an v.Groth vom 24.9.1872, BSB, Handschriftenabteilung, Grothiana X. Bereits K.v.Meyenn wies auf die Tatsache hin, daß es zwischen Christoffel und Kundt trotz einiger fachlicher Berührungspunkte (beide arbeiteten u.a. über die Dispersion) zu keiner Zusammenarbeit gekommen war. "Christoffel an der Kaiser-Wilhelms-Universität Straßburg", *Heimatblätter des Kreises Aachen*, 1978, 34/35:75-79, hier:75.
- ¹⁴ Nach einer Bemerkung von A.Kundt u. E.Warburg (Fußnote 6), *Annalen der Physik*, 155:363-364.
- ¹⁵ Ebd., 364-365.
- ¹⁶ O.E.Meyer, "Ueber die innere Reibung der Gase. Fünfte Abhandlung. Der Einfluß der Temperatur auf die Reibung." *Annalen der Physik*, 1873, 148:203-236, hier:220. A.Kundt u. E.Warburg gaben irrtümlich S.226 an: (Fußnote 6), *Annalen der Physik*, 155:539.
- ¹⁷ A.Kundt u. E.Warburg (Fußnote 6), *Annalen der Physik*, 155:550.

Abschnitt 4.2

- ¹ J.C.Maxwell, "On the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine*, 1866, 32:390-393; 1868, 35:129-145 und 185-217; *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge 1890, Nachdruck Paris 1927, Band 2, 26-78, hier:77. Die Formel von Maxwell enthielt noch den Faktor $1/s$, wobei s mißverständlich als "specific gravity" bezeichnet wurde. Es handelte sich um das Verhältnis der Kopplungskonstanten zweier Potentiale, die Maxwell für die Wechselwirkung verschiedener Teilchensorten eingeführt hatte. In einer als Beispiel dienenden Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Luft setzte er dann ohne Erläuterung $s=1$. Brush läßt dies unkommentiert: *The Kind of Motion We call Heat*, Band 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*, Amsterdam und New York: North-Holland 1976, 496-497.
- ² F.Narr, "Ueber die Erkaltung und Wärmeleitung in Gasen", *Annalen der Physik*, 1871, 142:123-158; S.G.Brush (Fußnote 1), Band 2, 499-500; F.Rosenberger, *Die Geschichte der Physik*, Band III: *Die Geschichte in den letzten hundert Jahren*, Braunschweig 1890, 673.
- ³ J.Stefan, "Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1872, 65:45-69.
- ⁴ Laut einer Rede von Boltzmann bei der Enthüllung des Stefan-Denkmal am 8.12.1895. "Josef Stefan", abgedruckt in: L.Boltzmann, *Populäre Schriften*, Leipzig 1905, gekürzter Nachdruck Braunschweig 1979, 59-66, hier:63-64.
- ⁵ J.Stefan, "Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen. Relative Bestimmungen der Wärmeleitungsvermögen verschiedener Gase", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1876, 72:69-101.
- ⁶ J.Stefan (Fußnote 3), 68. Von Kollegen wie Kundt und Warburg wurde das als hinreichend angesehen, denn diese kommentierten es in "Ueber Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase", *Annalen der Physik*, 1875, 155:337-366, 525-550 u. 156:177-211, hier: 155:337, mit den Worten: "... das bemerkenswerthe Gesetz der Unabhängigkeit dieses Coeffizienten vom Druck hat Stefan zwischen $1/2$ und 1 Atmosphäre bestätigt."
- ⁷ L.Boltzmann, "Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1872, 66:275-330, hier:333; dazu auch S.G.Brush (Fußnote 1), Band 2, 497.
- ⁸ L.Boltzmann (Fußnote 7), 333.
- ⁹ Diese Idee verfolgte Boltzmann schon länger: Bemerkung in "Noch Einiges über Kohlrausch's Versuch zur Bestimmung des Verhältnisses der Wärmecapacitäten von Gasen", *Annalen der Physik* 1870, 141:473-476, hier:476. Nachdem eine genügende Anzahl von Messungen der Wärmeleitungskoeffizienten vorlag, berechnete er rein phänomenologisch die unterschiedlichen Beiträge der beiden Bewegungsarten: "Bemerkungen über die Wärmeleitung der Gase", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1876, 72:458-470;

F.Rosenberger (Fußnote 2), 674-676; A.Klaus, *Über die Entwicklung der kinetischen Gastheorie und ihre Bedeutung für die moderne Physik*, Dissertation Freiburg 1904, 28-29.

- ¹⁰ Kundt und Warburg zitierten P.Desains u. F.de La Provostaye, *Annalen der Physik*, 1846, 68, 235-271.
- ¹¹ J.Müller, (Müller-Pouillet) *Lehrbuch der Physik und Meteorologie*, 8.Auflage Braunschweig 1879, Band 2, 2.Abteilung, 585-588; S.G.Brush in dem Abschnitt "The Dulong-Petit law of cooling", (Fußnote 1), Band 2, 478-483; F.Rosenberger (Fußnote 2), 219-221.
- ¹² Für das Verhältnis von Wärmestrahlung zu Leitung fanden sie genau 5,54 bzw. 2,16. A.Kundt u. E.Warburg (Fußnote 6), 156, 181. S.G.Brush gibt irrtümlich einen zu großen Beitrag für die Leitung an, (Fußnote 1), 501.
- ¹³ A.Kundt u. E.Warburg (Fußnote 6), 156:182.
- ¹⁴ Diese Zweifel bezogen sich auf Anwendungen bei höheren Temperaturen wie auf die Bestimmung der Sonnentemperatur. Das erwähnte J.Stefan in einem ausführlichen Kapitel über das Gesetz von Dulong und Petit in: "Über die Beziehung der Wärmestrahlung und der Temperatur", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1879, 79:391-428, hier:391. Die Einwände von Kundt und Warburg waren dagegen prinzipieller Art.
Ein Lehrbuch aus dem Jahr 1879 stellte das Gesetz von Dulong und Petit noch als die vollständige Lösung für das Problem der Erkaltung dar: J.Müller (Fußnote 11), 478; S.G.Brush nennt weitere Arbeiten jener Zeit, die von dessen Richtigkeit ausgingen. Dabei handelte es sich durchwegs um französische Autoren: (Fußnote 1), Band 2, 510 und 512.
- ¹⁵ A.Kundt u.E.Warburg, "Über Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase", *Monatsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* 1875, 160-173, hier:172; (Fußnote 6), 155:208.
- ¹⁶ A.Kundt u. E.Warburg, "Ueber die spezifische Wärme des Quecksilbergases", *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 1875, 8:945-948, datiert mit dem 9.7.1875; *Annalen der Physik*, 1876, 157:353-369.
- ¹⁷ J.Stefan (Fußnote 14). Diese Arbeit behandelt S.G.Brush in dem Abschnitt "The Stefan-Boltzmann law", (Fußnote 1), Band 2, 513-524. Stefan zitierte die Veröffentlichung von Kundt und Warburg im Zusammenhang mit der Konstanz des Wärmeleitungskoeffizienten. Bei seiner Kritik des Gesetzes von Dulong und Petit tat er es nicht. Der Beitrag von Kundt und Warburg soll hier nicht im Sinn einer nachträglichen Prioritätsreklamation herausgestellt werden, sondern die Verbindung zwischen den Untersuchungen der Wärmestrahlung und denen der verdünnten Gase besonders deutlich machen.
- ¹⁸ L.Graetz, "Ueber das Gesetz der Wärmestrahlung und das absolute Emissionsvermögen des Glases", *Annalen der Physik*, 1880, 11:913-930.

- ¹⁹ L.Boltzmann, "Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie", *Annalen der Physik*, 1884, 22:291-294; Brush (Fußnote 1), Band 2, 513-524 und 539-542.

Abschnitt 4.3

- ¹ L.Boltzmann, "Ueber das Wärmegleichgewicht zwischen mehratomigen Gasmoleculen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1871, 63:397-418.
- ² J.C.Maxwell, "On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies", *Nature*, 1875, 357-359 u. 374-377; *Journal of the Chemical Society*, 1875, 13:493-508; *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge 1890, Nachdruck Paris 1927, Band 2, 418-438, hier:433.
- ³ A.Kundt und E.Warburg, "Ueber die spezifische Wärme des Quecksilbergases", *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 1875, 8:945-948, datiert mit dem 9.7.1875; *Annalen der Physik*, 1876, 157:353-369; Boltzmann betonte in einer Rede auf der Naturforscherversammlung 1899 in München, daß dieser Versuch wegen seiner Schwierigkeit nie wiederholt worden und fast in Vergessenheit geraten sei: "Über die Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik in neuerer Zeit", *Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte der 71. Versammlung in München 1899*, Leipzig 1900, 99-122, hier:120; dagegen wurde die Kundtsche Methode nach 1875 für andere Gase verschiedentlich angewandt, A.Winkelmann, "Spezifische Wärme der Gase", *Handbuch der Physik*, Band 3: Wärme, 2.Auflage Leipzig: Ambrosius Barth 1906, 208-240, hier:218-219.
- ⁴ Laut A.Kundt u. E.Warburg (Fußnote 3), *Berichte ...*, 946 bzw. *Annalen ...*, 355.
- ⁵ A.Kundt u. E.Warburg (Fußnote 3), *Berichte ...*, 947 bzw. *Annalen ...*, 356.
- ⁶ A.Kundt u. E.Warburg (Fußnote 3), *Berichte ...*, 947; darauf wies auch Maxwell hin, (Fußnote 2), *The Scientific Papers ...*, 433.
- ⁷ W.Höflechner u. A.Hohenester, *Ludwig Boltzmann, Ausstellungskatalog Deutsches Museum München 1985*, 50. Die Quelle wird darin allerdings nicht angegeben.
- ⁸ P.Borscheid, *Naturwissenschaft, Staat und Industrie in Baden*, Stuttgart: Klett 1976, 164.
- ⁹ Schreiben der philosophischen Fakultät an den Senat vom 7.12.1875, Generallandesarchiv Karlsruhe, Aktenheft 235/7525.
- ¹⁰ Bericht des Ministerium des Innern an den Großherzog vom 31.12.1875, ebd.
- ¹¹ Personalblatt Warburg, Archiv der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

- ¹² Briefe von Warburg an den Direktor des Großherzoglichen Badischen Oberschulrates W. Nock vom 18.12. und 29.12.1875, Generallandesarchiv Karlsruhe, Aktenheft 235/7525; Röntgen bemängelte noch 1895, als er die Annahme einer Berufung nach Freiburg erwog, die ungenügende apparative Ausstattung. Er führte es darauf zurück, daß Warburg als Extraordinarius keine größeren Forderungen hatte stellen können. Brief von Röntgen an Zehnder vom 11.3.1895, abgedruckt in: L.Zehnder, *W.C.Röntgen. Briefe an L.Zehnder*, Zürich: Rascher & Zie 1935, 35.
- ¹³ Bestätigung des Großherzoglichen Staatsministeriums vom 5.1.1876; Schreiben des Ministerium des Innern an den Senat der Universität vom 8.1.1876; Generallandesarchiv Karlsruhe, Aktenheft 235/7525.
- ¹⁴ Des weiteren kaufte er 1876 ein Kathetometer und ein Spektrometer: H.Kangro, *Die Geschichte der Physik an der Universität Freiburg*, 1953 (Exemplar der Physikbibliothek der Universität Freiburg), 98.
- ¹⁵ E.Warburg, "Ueber die Gleitung an Glaswänden", *Annalen der Physik*, 1876, 159:399-415, datiert mit dem 9.7.1876. Darüber referierte er am 23.9.1876 auf der Naturforscherversammlung in Hamburg, *Tageblatt der 49.Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Hamburg*, Hamburg 1876, 129.
- ¹⁶ Ein indirekter Schluß aus der Tatsache, daß er für eine Messung das Datum des 28.Januar angab (Fußnote 15), *Annalen...*, 409.
- ¹⁷ Die Informationen über Warburg in Freiburg stammen aus H.Kangro (Fußnote 14), 89-95.
- ¹⁸ A.Kundt, "Apparat zur Demonstration der Reibung in einem sehr verdünnten Gas (Vakuum)", *Annalen der Physik*, 1876, 158:568-572 u. 660.
- ¹⁹ A.Kundt, "Apparat zur Demonstration des verschiedenen Wärmeleitungsvermögens der Gase", *Annalen der Physik*, 1877, 2:384-386.
- ²⁰ H.Kayser assistierte bei dem Vortrag und schildert das in: *Erinnerungen aus meinem Leben*, 1936, 88-89, unveröffentlicht, Exemplar des Hamburger Instituts für Geschichte der Naturwissenschaften.
- ²¹ Motto Kundt vom 22.12.1892, STPK, Sammlung Darmstaedter.
- ²² Schreiben der Fakultätsmitglieder an den Kurator der Universität Straßburg vom 25.4.1885 mit der Aufforderung Kundt zu halten, ABR AL 103 pag.104 No.527 Bl.35; Brief des Kurators an den Staatssekretär vom 2.5.1885, ebd. Bl.33; Brief von A.Baeyer an A.Kundt vom 29.4.1885, ebd. Bl.36-37; Brief von A.Kundt an P.v.Groth vom 17.5.1885, BSB, Handschriftenabteilung, Grothiana X.
Zuerst war E.Mach von der Münchener Fakultät für den verstorbenen P.Jolly vorgeschlagen worden. C.Jungnickel u. R.McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, Band 2: *The Now Mighty Theoretical Physics 1870-1925*, Chicago: The University of Chicago Press 1986, 151.

- 23 Das Gutachten vom November 1887 ist in der Handschrift von Helmholtz abgefaßt. W.v.Bezold hat es unterschrieben und einen kurzen Zusatz über Kohlrausch angefügt. UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.1461, Bl.151-152.
- 24 Ebd.
- 25 Ebd.
- 26 Ebd., Bl.153.
- 27 W.Höflechner u. A.Hohenester (Fußnote 7), 64-66; C.Jungnickel R.McCormmach (Fußnote 22), 149.
- 28 Nach der Auskunft des Stadtarchivs Straßburg über den Umzug von Kundt.
- 29 Gutachten der Fakultät in der Handschrift von Helmholtz vom 29.11.1888 mit den Unterschriften von v.Bezold, Zeller, Weierstrass, Schulze und Kundt. UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.1461, Bl.182-183. H.-J.Treder beschreibt den Vorgang etwas ungenau, wenn er angibt, die Namen Boltzmann, Hertz und Planck hätten nacheinander auf einer Liste gestanden. H.-J.Treder, "Zur Geschichte der Physik an der Berliner Akademie von 1870 bis 1930", in C.Kirsten u. H.-G.Körber (Hrsg.), *Physiker über Physiker*, Band 1, Berlin 1975, 11-48, hier:15.
- 30 Gutachten der Fakultät (Fußnote 29); das Zitat findet sich auch bei A.Hermann, *Planck*, Rowohlt 1984, 21. Dabei bezieht sich der Autor auf Akten aus Merseburg.
- 31 Protokoll der Fakultätssitzung, UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.1462, Bl.145a-b; Schreiben vom 11.6.1894, offenbar von Helmholtz, denn es trägt den Briefkopf der Reichsanstalt, ebd. Bl.145c-e.
- 32 W.Wien, "Friedrich Kohlrausch", *Annalen der Physik*, 1910, 31:449-450, hier:450; dazu auch D.Cahan, *The Physikalisch-Technische Reichsanstalt*, Dissertation Baltimore 1980, 266-267.
- 33 Planck teilte am 20.10.1894 mit, daß Kohlrausch ihm in einem Brief den Verzicht auf die Berufung mitgeteilt habe, UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.1462, Bl.162.
- 34 Zehnder, der Privatdozent in Freiburg war, berichtet von diesbezüglichen Erkundigungen der Fakultät über Warburgs Verhalten, L.Zehnder (Fußnote 12), 29-30; Warburg hatte sich schon vor längerer Zeit taufen lassen. In dem Lebenslauf (Vita) seiner Dissertation bekannte er sich noch zur jüdischen Konfession. In dem Personalblatt der Universität Freiburg (Fußnote 11) ist "jüd" durchgestrichen und durch die Angabe "evangelisch" ersetzt worden. Lange Zeit war eine Taufe ausreichend, um die Probleme zu beseitigen, die sich aus der jüdischen Herkunft für die akademische Karriere ergaben. Das schildert beispielsweise L.Koenigsberger in seiner Autobiographie: *Mein Leben*, Heidelberg: Winters 1919, 31. Rassistische Überlegungen fanden seit den achtziger Jahren zunehmend Eingang in Berufungsvorgänge. Dazu R.McCormmach, *Nachtgedanken eines klassischen Physikers*, Frankfurt: Insel-Verlag 1984, 186-188.

³⁵ Gutachten der Fakultät vom 8.11.1894, UA der HUB Phil.Fak.-Dekanat-Nr.1462, Bl.165-170; der kurze zeitliche Abstand zur Absage von Kohlrausch (Fußnote 33) läßt nicht erkennen, daß dem Votum für Warburg ein schwieriger Meinungsbildungsprozeß vorausgegangen war. So schildert es aber E.Fischer, damals Mitglied der Fakultät, in seiner Autobiographie: *Aus meinem Leben*, Berlin: Springer 1922, 160-163.

³⁶ Gutachten... (Fußnote 35).

Abschnitt 4.4

- ¹ Warburg wurde am 13.8.1895 zum Mitglied der Berliner Akademie der Wissenschaften gewählt. C.Kirsten u. H.-G.Körber (Hrsg.), *Physiker über Physiker*, Band 1, Berlin: Akademie-Verlag, 131.
- ² J.Franck, "Emil Warburg zum Gedächtnis", *Die Naturwissenschaften*, 1931, 19:993-997, hier:995.
- ³ Nach einem Brief von M.v.Smoluchowski an seine Eltern vom Mai 1897, laut A.Teske, *Marian von Smoluchowski Leben und Werk*, Wroclaw 1977, deutsche Übersetzung des polnischen Originals von 1955, 55.
- ⁴ "Curriculum vitae" von Smoluchowski in dessen Habilitationsakte, Archiv der Universität Wien. Die Dissertation wurde publiziert: "Akustische Untersuchungen über die Elastizität weicher Körper", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1894, 103:739-772; dazu auch: A.Teske (Fußnote 3), 19. In einem späteren Aufsatz gibt Teske irrtümlich Stefan als Doktorvater an: "Einstein und Smoluchowski", *Sudhoffs Archiv*, 1969, 53:292-305, hier:293. Stefan starb jedoch bereits am 7.1.1893.
- ⁵ A.Teske (Fußnote 3), 27-33.
- ⁶ Das betonte Smoluchowski auch später noch. So in einem Brief vom 15.11.1910 an L.Darmstaedter. Es handelte sich um eine kurze Selbstdarstellung für dessen Autographensammlung: STPK, Sammlung Darmstaedter, Smoluchowski Flb 1898(1); auszugsweise bei Teske (Fußnote 3), 243.
- ⁷ A.Teske (Fußnote 3), 39-51.
- ⁸ Abgedruckt in: ebd., 51-52.
- ⁹ Brief von E.Warburg an M.v.Smoluchowski vom 25.3., Brief von M.v.Smoluchowski an E.Warburg vom 27.3.1897, laut A.Teske ebd., 56.
- ¹⁰ Brief von M.v.Smoluchowski an seine Eltern vom 14.5.1897, auszugsweise abgedruckt in: ebd., 58.
- ¹¹ Brief von M.v.Smoluchowski an seine Mutter vom 1.6.1897, abgedruckt in: ebd., 60.
- ¹² Ebd., 60.
- ¹³ Nach einer Ankündigung von M.v.Smoluchowski in seiner Arbeit: "Ueber die Wärmeleitung in verdünnten Gasen", *Annalen der Physik*, 1898, 64:101-130, hier: 103. Laut Angabe auf S.130 wurde sie am 28.11.1897 eingereicht.
- ¹⁴ Statt des Temperaturunterschiedes setzte Smoluchowski hier irrtümlich die Temperatur des Thermometers ein. Ebd., 109.

- ¹⁵ Als Beispiel ein Auszug einer Meßreihe für Luft, ebd., 124:

t [sec]	p [mm Hg]	λ [cm]	λ/λ
184,0	710		
190,5	2,57	0,00469	1,58
202,4	0,90	0,0136	1,61
227,5	0,371	0,0337	1,64
255,8	0,213	0,0587	1,64
320,0	0,095	0,127	1,58
411,1	0,0466	0,264	1,61
552,8	0,0173	0,690	1,57
644,1	0,0086	1,41	1,59

- ¹⁶ Ebd., 128.

- ¹⁷ M.v.Smoluchowski, "Über den Temperatursprung bei Wärmeleitung in Gasen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1898, 107:304-329, hier:306.

- ¹⁸ Ebd.

- ¹⁹ Das deckt sich auch mit Boltzmanns Einschätzung, der bei den Engländern ein größeres Interesse an der kinetischen Gastheorie konstatierte: Brief von Boltzmann an Nature, "On Certain Questions of the Theory of Gases", *Nature* vom 28.2.1895, 51:413-415, hier:413. Abgedruckt und übersetzt in: S.G.Brush, Vorwort zu *Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe*, Band 1: *Vorlesungen über Gastheorie*, Braunschweig 1981, 22*-26*.

- ²⁰ M.v.Smoluchowski, "On Conduction of Heat by Rarefied Gases", *Philosophical Magazine*, 1898, 46:192-206, hier:205. Das Zitat lautet im Original: "This perfect agreement between the experimental facts and the kinetic theory of gases might be considered as a new strong evidence in favour of the latter, if such evidence were wanted any more."

- ²¹ Brief von M.v.Smoluchowski vom 14.5.1897 (Fußnote 10).

- ²² Bei den anderen Themen handelte es sich um "Vektoralgebra mit Quaternionenrechnung mit Rücksicht auf deren Anwendungen in der Physik", "Ausgewählte Kapitel aus der physikalischen Chemie" und "Strahlung der Energie". Habilitationsakte Smoluchowski, Archiv der Universität Wien, Z 1040..

- ²³ Kommissionsbericht über das Habilitationsgesuch des Herrn Dr.v.Smoluchowski vom 29.4.1898, ebd.

- ²⁴ Die beiden Alternativvorschläge von Smoluchowski waren "Die Art der Wechselwirkung zwischen Gasmolekülen" und "Anwendbarkeit der Vektoren- und Quaternionenrechnung in der Physik", ebd.

- ²⁵ Bestätigung des Ministeriums für Cultus und Unterricht vom 31.7.1898, Z.19919, ebd.

- ²⁶ A.Teske (Fußnote 3), 123.

Abschnitt 4.5

- ¹ O.E.Meyer, *Die Kinetische Theorie der Gase*, 2.Auflage Breslau 1899, V.
- ² Ein Manuskript lag bereits 1876 zum 50jährigen Doktorjubiläum von Franz Neumann vor. Laut Katalog Nr.58 des Antiquariats G.Renner vom Dezember 1982, 7.
- ³ In der Meyers Buch folgenden Auflage des Müller-Pouillet stand am Ende des Abschnitts über die kinetische Gasttheorie: "Näheres hierüber findet man in den Originalabhandlungen von Clausius, Maxwell, Loschmidt, Stefan, Boltzmann, O.E.Meyer und Anderen, so wie in des letzteren Lehrbuch 'die kinetische Theorie der Gase'"; J.Müller, *Lehrbuch der Physik und Meteorologie*, Band 2, 2.Abteilung, 8.Auflage Braunschweig 1879, 519-520.
Der erste Teil der zweiten Auflage von Meyers Buch erschien 1895, der zweite 1899, fast gleichzeitig mit der englischen Übersetzung. Dieses Werk behielt auch neben Boltzmanns stark mathematisch orientierten *Vorlesungen über Gastheorie*, die 1896 und 1898 herauskamen, seine Bedeutung. So empfahl es beispielsweise der junge Einstein seiner späteren Frau Mileva Maric in einem Brief vom 30.4.1901, abgedruckt in: *The Collected Papers of Albert Einstein*, Band 1: *The Early Years 1879-1902*, Princeton: Princeton University Press 1987, 294. Noch 1922 verwies ein anderes Lehrbuch auf das von Meyer: Warburg, *Lehrbuch der Experimentalphysik für Studierende*, 19.u.20.Auflage Dresden und Leipzig: Steinkopff 1922, 167.
- ⁴ L.Graetz, "Reibung", in A.Winkelmann, *Handbuch der Physik*, Band 1: *Allgemeine Physik*, Leipzig: Ambrosius Barth 1891, 598.
- ⁵ J.Loschmidt, "Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1876, 73:128-142 u. 366-372; 1877, 75:287-298; 76:209-225; L.Boltzmann antwortete in: "Über die Beziehung eines allgemeinen mechanischen Satzes zum zweiten Hauptsatze der Wärmetheorie", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1877, 75:67-73.
- ⁶ H.Poincaré, "Sur le problème des trois corps et les équations de dynamique", *Acta Mathematica*, 1890, 13:1-270.
- ⁷ Hier gab es eine Kontroverse mit E.Zermelo, der die Ergebnisse von Poincaré einige Jahre später auf die kinetische Gastheorie anwandte: "Ueber einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmelehre", *Annalen der Physik*, 1896, 57:485-494; L.Boltzmann, "Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Herrn E.Zermelo", *Annalen der Physik*, 1896, 57:773-784; E.Zermelo, "Über mechanische Erklärungen irreversibler Vorgänge. Eine Antwort auf Hr. Boltzmanns 'Entgegnung'", *Annalen der Physik*, 1897, 59:793-801; L.Boltzmann, "Zu Hr. Zermelos Abhandlung 'Über die mechanische Erklärung irreversibler Vorgänge'", *Annalen der Physik*, 1897, 60:392-398.

- ⁸ Eine kurze Bibliographie findet sich in S.G.Brush, *The Kind of Motion We call Heat*, Band 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*, Amsterdam und New York: North-Holland 1976, 750-751.
- ⁹ Meyer hatte ihm auf der vorangegangenen Naturforscherversammlung 1889 in Heidelberg davon erzählt: Brief von L.Natanson an F.Auerbach vom 2.7.1890, STPK, Nachlaß Auerbach.
- ¹⁰ Im Abschnitt 3.1 wurde die Einstellung von Magnus durch seine Ablehnung spekulativer Ideen und die von ihm propagierte Selbstbeschränkung auf rein empirische Fakten charakterisiert. Ähnliche Überzeugungen finden sich im Zusammenhang mit der Atomhypothese auch später wieder. H.Helmholtz sprach sich 1871 zwar nicht gegen die Existenz der Atome aus, aber "gegen das Streben, aus rein hypothetischen Annahmen über Atombau der Naturkörper die Grundlagen der theoretischen Physik herzuleiten." Gedächtnisrede auf Gustav Magnus vom 6.7.1871, abgedruckt in: C.Kirsten u.H.-G.Körber (Hrsg.), *Physiker über Physiker*, Band 2, Berlin: Akademie-Verlag 1979, 56-66, hier:63. H.Hertz berichtete, daß es G.Kirchhoff fast peinlich berührt hätte, die Atome und ihre Schwingungen ohne zwingende Notwendigkeit in den Mittelpunkt einer theoretischen Ableitung gestellt zu sehen. Laut H.Hertz, *Über die Prinzipien der Mechanik*, Leipzig 1894, Abdruck der Einleitung in: R.Rompe u. H.-J.Treder (Hrsg.), *Zur Grundlegung der theoretischen Physik*, Berlin: Akademie-Verlag 1984, 99-100. E.Mach ging in seiner Kritik der physikalischen Begriffe noch weiter. Da dem Atom keine Beobachtungsgröße zugeordnet werden konnte, war das damit verbundene Bild für ihn wertlos. E.Mach, *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Energie*, Prag: Colve 1872, 33.
- ¹¹ Als Beispiel für einen solchen Erfolg führte Planck die Erklärung des Verhaltens gelöster Stoffe in verdünnten Lösungen an: "Allgemeines zur neueren Entwicklung der Wärmetheorie", *Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte*, 64.Versammlung zu Halle 1891, Leipzig 1891, 55-61, hier:55; Dazu auch W.Ostwald in seiner Autobiographie *Lebenslinien*, Band 2: 1887-1905, Berlin 1927, 187-188.
- ¹² G.Helm, *Die Lehre von der Energie historisch kritisch entwickelt*, Leipzig: Veit 1887.
- ¹³ Diese Jahreszahl nannte W.Ostwald in seiner Autobiographie (Fußnote 11), 165. Im Unterschied zu Helm faßte Ostwald die Energie als eine reale Substanz auf; ebd., 158.
- ¹⁴ G.Helm (Fußnote 12), 1-3; dabei zitierte er: Avenarius, *Philosophie als Denken der Welt gemäß dem Prinzip des kleinsten Kraftmaasses*, Leipzig: Fues 1876; Kirchhoff, *Vorlesungen über mathematische Physik*, Leipzig: Teubner 1876; Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig: Brockhaus 1883. Der Einfluß von Mach ist offenbar auch bei dem Titel von Helms Buch wirksam gewesen.
- ¹⁵ G.Helm, *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung*, Leipzig: Arthur Felix 1898, 362.
- ¹⁶ W.Ostwald (Fußnote 11), 166.

- ¹⁷ G.Helm (Fußnote 12), 71.
- ¹⁸ G.Helm (Fußnote 15), 364.
- ¹⁹ *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 1894, 15, 527-528.
- ²⁰ Einige Autoren beschäftigen sich insbesondere mit den Einzelheiten dieser Versammlung, wo nach ihrer Ansicht der Höhepunkt der Auseinandersetzungen um die kinetische Gastheorie stattfand. Dabei betonen sie die Zustimmung, die Boltzmann dort erhielt, während die Ideen der Energetiker bei den Anwesenden auf deutliche Ablehnung stießen. Die Zweifel an der kinetischen Gastheorie erscheinen in diesen Darstellungen unberechtigt, die Vorgänge bleiben unverständlich: E.Hiebert, "The Energetics Controversy and the New Thermodynamics", in D.H.D.Roller, *Perspectives in the History of Science and Technology*, Norman: University of Oklahoma Press 1971, 67-86; W.Kaiser, "Boltzmanns Mechanische Darstellung von Thermodynamik und Elektrodynamik", in R.Sexl u. J.Blackmore (Hrsg.), *Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe*, Band 8: *Ausgewählte Abhandlungen*, Graz: Akademische Druck- und Verlagsanstalt 1982, 207-230, hier:209-211.
- ²¹ L.Boltzmann, "Ein Wort der Mathematik an die Energetik", *Annalen der Physik*, 1896, 57:39-71, datiert mit dem 2.11.1895, hier:39, 64 u.70.
- ²² L.Boltzmann, "Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft", *Annalen der Physik*, 1896, 60:231-247, hier:232 u.242.
- ²³ L.Boltzmann (Fußnote 21), 65.
- ²⁴ L.Boltzmann, ebd., 70-71.
- ²⁵ L.Boltzmann, "Festrede, gehalten am 5.11.1899 anlässlich der Enthüllung des Denkmals des Universitätsprofessors Dr.Joseph Loschmidt." *Physikalische Zeitschrift*, 1900, 1:169-171, 180-182, hier:180.
J.T.Blackmore meint zu diesem Zitat, Boltzmann wäre sich der Unterschiede zwischen realistischen und phänomenologischen Betrachtungsweisen nicht bewußt gewesen: "Boltzmann's Concessions to Mach's Philosophy of Science", in R.Sexl u. J.Blackmore (Hrsg.), *Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe*, Band 8: *Ausgewählte Abhandlungen*, Graz: Akademische Druck- und Verlagsanstalt 1982, 155-190, hier:156. Boltzmanns Denken läßt sich aber durch die Kategorien "realistisch" oder "phänomenologisch" nur unzureichend erfassen. Die mechanischen Modelle waren für ihn Analogien. Stimmt ihre Ergebnisse in vielen Details mit den Naturvorgängen überein, so fand er das befriedigend, "auch wenn die wahre Natur der Tatsachen nicht in jeder Beziehung enthüllt wird." Brief an "Nature" vom 28.2.1895, abgedruckt und übersetzt in: S.G.Brush, Vorwort zu *Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe*, Band 1: *Vorlesungen über Gastheorie*, Graz: Akademische Druck- und Verlagsanstalt 1981, 22*-26*.

Im gleichen Jahr schrieb er in der Einleitung zu dem ersten Teil seiner *Vorlesungen über Gastheorie*: "Indem wir die Vorstellungen der Gastheorie als mechanische Analogien bezeichnen, drücken wir schon durch die Wahl dieses Wortes deutlich aus, wie weit wir von der Vorstellung entfernt sind, als träfen sie in allen Stücken die wahre Beschaffenheit der kleinsten Theile der Körper". Ebd., 4. Für das Vorwort wählte er das Motto: "Alles Vergängliche ist nur ein Gleichnis!" Elkana deutet dies als eine entscheidende Problemverschiebung im wissenschaftlichen Forschungsprogramm Boltzmanns, der eine zuvor realistische Haltung zugunsten der "Vorstellungsbilder" aufgegeben hätte. Y. Elkana, *Anthropologie der Erkenntnis*, Frankfurt: Suhrkamp 1986, 207. Elkana übersieht, daß Boltzmann schon früher ähnlich vorgegangen war. So beispielsweise in seiner phänomenologischen Behandlung der Wärmeleitung: "Bemerkungen über die Wärmeleitung der Gase", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1876, 72:458-470.

- ²⁶ E. Warburg, *Lehrbuch der Experimentalphysik für Studierende*, Freiburg und Leipzig: Mohr 1893, 91; in einem am 2.12.1900 gehaltenen populären Vortrag erläuterte Warburg dies ganz ausführlich: *Ueber die kinetische Theorie der Gase*, Berlin 1900.
- ²⁷ Die Energetik wurde von den verschiedensten Seiten angegriffen, so auch von M. Planck, "Gegen die neuere Energetik", *Annalen der Physik*, 1896, 57:72-78.
- ²⁸ Blackmore sieht Ursache und Wirkung genau umgekehrt und glaubt, daß u.a. die Beiträge von Mach, Ostwald, Helm den wissenschaftlichen Fortschritt aufgehalten hätten. J.T. Blackmore (Fußnote 25), 166.

B I B L I O G R A P H I E

Unveröffentlichte Quellen

Manuskripte:

P.v.Groth, *Lebenserinnerungen*, BSB, Handschriftenabteilung, Grothiana I.

H.Kayser, *Erinnerungen aus meinem Leben*, 1936, Exemplar des Instituts für Geschichte der Naturwissenschaften.

Universitätsakten:

Staatsarchiv des Kantons Basel-Stadt:

Nachfolge G.Wiedemann 1863, Erziehungsakten CC 24.

Universitätsarchiv der Humboldt-Universität Berlin:

Akten der Philosophischen Fakultät betreffend:

die Promotion von Magnus, Phil.Fak.211 Bl.232-234;
die Promotion von Kundt, Phil.Fak.238 Bl.819-823;
die Promotion von Warburg, Phil.Fak.242 Bl.355-359;
die Habilitation von Magnus, Phil.Fak.1201 Bl.79-83;
die Habilitation von Kundt, Phil.Fak. 1207 Bl.295-301;
die Habilitation von Warburg, Phil.Fak.1208 Bl.171-179;
die Berufung von Magnus, Phil.Fak.1456 Bl.150-174;
die Berufung von Kundt, Phil.Fak.1461 Bl.151-156;
die Berufung von Warburg, Phil.Fak.1462 Bl.145, 165-175.

Archiv der Universität Freiburg:

Personalakte Warburg.

Archiv der Universität Göttingen:

Personalakte O.E.Meyer, Az.4 Vc Nr.104.

Archiv der Universität Heidelberg:

Nachfolge Jolly 1854, III 5a Nr.80.

Generallandesarchiv Karlsruhe:

Berufungsvorgang Warburg 1875/76, Aktenheft 235/7525.

Archive du Bas-Rhin Straßburg (ABR):

Berufungsvorgang Kundt 1871/72, AL 103 pag.104.

Archiv der Universität Wien:

Habilitationsakte Smoluchowski, Z 1040.

Archiv der Universität Wroclaw:

Lebenslauf von O.E.Meyer, Personalakte der Universität Breslau.

Archiv der ETH Zürich:

Berufungsvorgang Kundt 1867/68, verstreut in den chronologisch geordneten Jahrgangsakten.

Briefe:

Handschriftenabteilung der Staatsbibliothek Preußischer Kulturbesitz Berlin-West (STPK):

Sammlung Darmstaedter:

Johann Franz Encke J 1824(4),
Gustav Magnus F2d 1835(1),
Heinrich Wilhelm Dove F1f 1840(1),
August Krönig F1a 1856(3),
Rudolph Clausius F1d 1868(1),
August Kundt F1b 1870,
Josef Stefan F1a 1871(3),
Oskar Emil Meyer F2a 1877(4),
Emil Warburg F1e 1880,
Marian v. Smoluchowski F1b 1898(1).

Nachlaß Warburg.

2 Briefe G.Magnus an A.v.Humboldt, Nachlaß Humboldt, K8, Nr.15.
2 Briefe R.Clausius an A.v.Humboldt, Nachlaß Humboldt, K12 Nr.37.
Brief von L.Natanson an F.Auerbach, Nachlaß Auerbach.

Handschriftenabteilung der Universitätsbibliothek Bonn:

Brief von O.E.Meyer an Gehring, ohne Ziffer.
Brief von G.Magnus an F.Mohr, S 1413.

Archiv der Universität Göttingen:

- 3 Briefe von O.E.Meyer an Wagner, Wagner 34.
- 2 Briefe von O.E.Meyer an Dziatzko, Dziatzko 69:9, 144 u. 145.
- 12 Briefe von O.E.Meyer an F.Neumann, Franz Neumann 53 II.
- 6 Briefe von M.v.Smoluchowski an D.Hilbert, Hilbert 376.

Archiv der Universität Heidelberg:

Brief von O.E.Meyer an J.W.Brühl, Heid.Hs.3833.

Sondersammlung des Deutschen Museums München:

- Clausius' Mitschriften seiner Mathematikvorlesungen.
- Clausius' Ausarbeitung einer Abhandlung von Maxwell, Nr.3424.
- Brief von G.Magnus an E.Mitscherlich, Nr.512.
- 7 Briefe von A.Kundt an L.Graetz.

Siemens Museum München:

- 2 Briefe von G.Magnus an Werner Siemens.
- Brief von Werner an Wilhelm Siemens.

Handschriftenabteilung der Bayerischen Staatsbibliothek München (BSB):

- 29 Briefe von G.Magnus an W.Liebig, Liebigiana.
- 2 Briefe von G.Magnus an P.Groth, Grothiana X.
- 8 Briefe bzw. Postkarten von A.Kundt an P.Groth, Grothiana X.
- 16 Briefe bzw. Postkarten von E.Warburg an P.Groth, Grothiana X.

Hauptstaatsarchiv Stuttgart:

Bericht des Generalmajors von Sontheim über das Studium des Württembergischen Kronprinzen Karl in Berlin, E 14 Bü 65.

Gedruckte Quellen

Avenarius, R.H.L.

- 1876 *Philosophie als Denken der Welt gemäss dem Prinzip des kleinsten Kraftmaasses*, Leipzig: Fues 1876.

Bernoulli, Daniel

- 1859 "Daniel Bernoulli's Ansicht über die Constitution der Gase", Nachdruck aus seiner Hydrodynamik von 1738: *Annalen der Physik*, 1859, 107:490-494.

Bois-Reymond, Emil du

- 1889 "Erwiderung auf die Antrittsrede von August Kundt vor der Akademie der Wissenschaften vom 4.7.1889", abgedruckt in: (Kirsten u. Körber 1975), Band 2, 161-163.

Boltzmann, Ludwig

- 1870 "Noch Einiges über Kohlrausch's Versuch zur Bestimmung des Verhältnisses der Wärmecapacitäten von Gasen", *Annalen der Physik*, 1870, 141:473-476.
- 1871 "Ueber das Wärmegleichgewicht zwischen mehratomigen Gas-molekülen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1871 63:397-418.
- 1872 "Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1872, 66:275-330.
- 1876 "Bemerkungen über die Wärmeleitung der Gase", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1876, 72:458-470.
- 1877 "Über die Beziehung eines allgemeinen mechanischen Satzes zum zweiten Hauptsatze der Wärmetheorie", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1877, 75:67-73.
- 1884 "Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie", *Annalen der Physik*, 1884, 22:291-294.
- 1895a "On Certain Questions of the Theory of Gases", Brief an *Nature* vom 28.2.1895, 51:413-415. Mit Übersetzung in: S.G.Brush, Vorwort zu *Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe*, Band 1: *Vorlesungen über Gastheorie*, Graz 1981, 22*-26*.
- 1895b "Gedenkrede auf Joseph Loschmidt", gehalten am 29.10.1895 in der Chemisch-Physikalischen Gesellschaft in Wien. *Physikalische Zeitschrift*, 1900, 1:254-257, 264-267.
- 1895c "Josef Stefan", Gedenkrede vom 8.12.1895, *Populäre Schriften*, Leipzig 1905, Nachdruck Braunschweig 1979, 59-66.

- 1896a *Vorlesungen über Gastheorie, I.Theil: Theorie der Gase mit einatomigen Molekülen, deren Dimensionen gegen die mittlere Weglänge verschwinden.* Leipzig: Ambrosius Barth, 1896; II.Theil: *Theorie van der Waals'; Gasdissociation; Schlussbemerkungen.* Leipzig: Ambrosius Barth, 1898; Nachdruck als Band 1 der *Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe*, Graz: Akademische Druck- und Verlagsanstalt 1981.
- 1896b "Ein Wort der Mathematik an die Energetik", *Annalen der Physik* 1896, 57:39-71. Datiert mit dem 2.11.1895.
- 1896c "Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Herrn E.Zermelo", *Annalen der Physik*, 1896, 57:773-784.
- 1896d "Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft", *Annalen der Physik*, 1896, 60:231-247.
- 1897a "Zu Hrn. Zermelos Abhandlung 'Über die mechanische Erklärung irreversibler Vorgänge'", *Annalen der Physik*, 1897, 60:392-398.
- 1897b "Nochmals über die Atomistik", *Annalen der Physik*, 1897, 61:790-793.
- 1899a "Über die Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik in neuerer Zeit", *Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte der 71.Versammlung in München 1899*, Teil 1, Leipzig 1900, 99-122.
- 1899b "Festrede, gehalten am 5.11.1899 anlässlich der Enthüllung des Denkmals des Universitätsprofessors Dr.Joseph Loschmidt." *Physikalische Zeitschrift*, 1900, 1:169-171, 180-182.
- 1900 "Zur Geschichte unserer Kenntnis der inneren Reibung und Wärmeleitung in verdünnten Gasen", *Physikalische Zeitschrift*, 1900, 1:213.
- 1905 *Populäre Schriften*, Leipzig: Ambrosius Barth 1905; Auszugsweiser Nachdruck Braunschweig: Vieweg 1979.
- Boltzmann, L. u. Nabl, J.
- 1905 "Kinetische Theorie der Materie", *Enzyklopädie der Mathematischen Wissenschaften*, A.Sommerfeld (Hrsg.), Band 5, Leipzig: Teubner 1905, 493-557.
- Bossut
- 1775 *Traité élémentaire d'hydrodynamique*, Paris 1775.
- Buy-Ballot, C.H.D.
- 1853 "Schets eener physiologie van het onbewerktuigde ryk der Natuur", *Fortschritte der Physik für 1849*, 1853, 5:3-16.
- 1857 "Wesen der Electricität und Wärme", *Amtlicher Bericht über die 33.Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Bonn im September 1857*, Bonn 1859, 164-167.

1858 "Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme und Electricität nennen", *Annalen der Physik*, 1858, 103:240-259.

Byk, Alfred

1910 *Einführung in die kinetische Theorie der Gase*, Leipzig und Berlin: Teubner 1910.

Carnot, Sadi

1824 *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propres à développer cette Puissance*, Paris 1824; *Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen*, W.Ostwald (Hrsg.), Ostwalds Klassiker Nr.37, Leipzig: Engelmann 1892.

Clapeyron, B.P.É.

1834 "Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur", *Journal de l'Ecole Polytechnique*, 1834, 14:153-190. "Ueber die bewegende Kraft der Wärme", *Annalen der Physik*, 1843, 59:446-451 u.566-586. *Abhandlung über die bewegende Kraft der Wärme*, K.Schreiber (Hrsg.), Ostwalds Klassiker Nr.216, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1926.

Clausius, Rudolph

1847a *De iis atmosphaerae particulis quibus lumen reflectitur*, Dissertation Halle 1847.

1847b "Ueber die Lichtzerstreuung in der Atmosphäre, und über die Intensität des durch die Atmosphäre reflectirten Sonnenlichts", *Annalen der Physik*, 1847, 72:294-314.

1849a "Ueber die Veränderungen welche in den bisher gebräuchlichen Formeln für das Gleichgewicht und die Bewegung elastischer fester Körper durch neuere Beobachtungen nothwendig geworden sind", *Annalen der Physik*, 1849, 76:46-67.

1849b "Ueber die blaue Farbe des Himmels und die Morgen- und Abendröthe", *Annalen der Physik*, 1849, 76:188-195.

1850a "Uebersichtliche Darstellung der in das Gebiet der meteorologischen Optik gehörenden Erscheinungen", *Grunerts Meteorologische Optik*, 1850, I:367-462.

1850b "Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen", *Annalen der Physik*, 1850, 79:368-397 u.500-524. M.Planck (Hrsg.), Ostwalds Klassiker Nr.99, Leipzig: Engelmann 1898.

1851 "Erwiderung auf die im Märzheft d. Annalen enthaltenen Bemerkungen des Hrn. C.Holtzmann (über die bewegende Kraft der Wärme)", *Annalen der Physik*, 1851, 83:118-125.

1856 "Notiz über den Zusammenhang zwischen dem Satz von der Aequivalenz der Wärme und Arbeit und dem Verhalten der Gase", *Annalen der Physik*, 1856, 98:173-178.

- 1857a "Ueber das Wesen der Wärme, verglichen mit Licht und Schall", *Monatsschrift des wissenschaftlichen Vereins in Zürich*, 1857, 2:73-99.
- 1857b "Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen", *Annalen der Physik*, 1857, 100:353-380.
- 1858a "Ueber die Natur des Ozons", *Annalen der Physik*, 1858, 103:644-652.
- 1858b "Ueber die mittlere Länge der Wege, welche bei der Molecularbewegung gasförmiger Körper von den einzelnen Moleculen zurückgelegt werden, nebst einigen anderen Bemerkungen über die Mechanische Wärmetheorie", *Annalen der Physik*, 1858, 105:239-258.
- 1858c "Bericht über die zur Preisbewerbung eingesandte Arbeit: 'Recherches expérimentales sur la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur von Hrn. G.A.Hirn in Logelbach bei Colmar'", *Fortschritte der Physik für 1855*, 1858, 11:XIV-XXVIII.
- 1858d "Ueber die Molecularbewegungen in gasförmigen Körpern", *Amtlicher Bericht über die 34.Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Carlsruhe im September 1858*, Carlsruhe 1859, 152-153.
- 1860 "On the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine*, 1860, 19:434-436.
- 1862 "Ueber die Wärmeleitung gasförmiger Körper", *Annalen der Physik* 1862, 115:1-56.
- 1863 "Ueber Molecularbewegungen in gasförmigen Körpern", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1863, 46:402-404.
- 1864 *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie*, 2 Bände, Braunschweig: Vieweg 1864-1867.
- 1876 *Die mechanische Wärmetheorie*, Band 1: *Entwicklung der Theorie, soweit sie sich aus den beiden Hauptsätzen ableiten läßt* 1876; Band 2: *Die mechanische Behandlung der Elektrizität* 1879; Band 3: M.Planck u. C.Pulfrich (Hrsg.), *Entwicklung der besonderen Vorstellungen von der Natur der Wärme als einer Art der Bewegung*. 1889-1891, Braunschweig: Vieweg.
- Dove, Heinrich Wilhelm
- 1841 *Repertorium der Physik*, Band 4, Berlin 1841.
- Dubuat
- 1786 *Principes d'hydraulique, vérifiés par un grand nombre d'expériences*, Paris 1786.
- Einstein, Albert
- 1917 "Marian v. Smoluchowski", *Die Naturwissenschaften*, 1917, 5:737-738.

- 1922 "Emil Warburg als Forscher", *Die Naturwissenschaften*, 1922, 10:823-828.
- 1987 *The Collected Papers of Albert Einstein*, Band 1: *The Early Years 1879-1902*, J. Stachel (Hrsg.), Princeton: Princeton University Press 1987.
- Fechner, Gustav Theodor
- 1855 *Ueber die physikalische und philosophische Atomenlehre*, Leipzig 1855.
- Fischer, Emil
- 1922 *Aus meinem Leben*, Berlin: Springer 1922.
- Fourier, Joseph
- 1822 *Théorie Analytique de la Chaleur*, Paris 1822.
- Franck, James
- 1931 "Emil Warburg zum Gedächtnis", *Die Naturwissenschaften* 1931, 19:993-997.
- Graetz, Leo
- 1880 "Ueber das Gesetz der Wärmestrahlung und das absolute Emissionsvermögen des Glases", *Annalen der Physik*, 1880, 11:913-930.
- 1906a "Wärmestrahlung", in A. Winkelmann, *Handbuch der Physik*, Band 3: *Wärme*, 2. Auflage Leipzig 1906, 241-435.
- 1906b "Wärmeleitung", in A. Winkelmann, *Handbuch der Physik*, Band 3: *Wärme*, 2. Auflage Leipzig 1906, 435-536.
- 1908 "Reibung", in A. Winkelmann, *Handbuch der Physik*, Band 1: *Allgemeine Physik*, Leipzig 1908, 1373-1414.
- Graham, Thomas
- 1846 "On the motion of gases", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1846, 136:573-632; 1849, 139:349-392.
- Grove, William Robert
- 1845 "On the application of voltaic ignition to lighting mines", *Philosophical Magazine*, 1845, 27:442-446.
- 1849 "On effect of surrounding media on voltaic ignition", *Philosophical Magazine* 1849, 35:114-126; übersetzt in: *Annalen der Physik*, 1849, 78:366-381.
- Grüneisen, Eduard
- 1926 "Emil Warburg zum achtzigsten Geburtstag", *Die Naturwissenschaften*, 1926, 14:203-207.

Guttstadt, A.

- 1886 Hrsg.: *Die naturwissenschaftlichen und medicinischen Staatsanstalten Berlins. Festschrift für die 59. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte*, Berlin 1886.

Hagen, Gotthilf

- 1839 "Ueber die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Röhren", *Annalen der Physik*, 1839, 46:423-442.

Hagenbach-Bischoff, Eduard

- 1860 "Ueber die Bestimmung der Zähigkeit einer Flüssigkeit durch den Ausfluß aus Röhren", *Annalen der Physik*, 1860, 109:385-426.

Helm, Georg

- 1887 *Die Lehre von der Energie historisch kritisch entwickelt*, Leipzig: Veit 1887.
- 1898 *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung*, Leipzig: Arthur Felix 1898.

Helmholtz, Hermann

- 1847 *Ueber die Erhaltung der Kraft*, Berlin: Reimer 1847.
Ostwalds Klassiker Nr.1, Leipzig: Engelmann 1889.
- 1855 "Theorie der Wärme", *Fortschritte der Physik für 1850 u.1851*, 1855, 6 u.7:561-598.
- 1858 "Ueber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen", *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1858, 55:25-55. Mit einer weiteren Arbeit in: A.Wangerin (Hrsg.), *Zwei hydrodynamische Abhandlungen*, Ostwalds Klassiker Nr.79, Leipzig: Engelmann, 1896.
- 1863 *Die Lehre von den Tonempfindungen, als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Braunschweig: Vieweg 1863
- 1871 "Gedächtnisrede auf Gustav Magnus" vom 6.7.1871, abgedruckt in: (Kirsten u. Körber 1975), Band 2, 56-66.
- 1888 "Wahlvorschlag für August Kundt vom 8.2.1888", abgedruckt in: (Kirsten u. Körber 1975), Band 1, 107-108.
- 1889 "Zur Erinnerung an Rudolph Clausius", *Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft*, 1889, 8:1-7.
- 1891 *Hermann Helmholtz über sich selbst. Rede zu seinem 70. Geburtstag*. Leipzig: Teubner 1966.

Helmholtz, Hermann und Piotrowski, Gustav v.

- 1860 "Ueber die Reibung tropfbarer Flüssigkeiten", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1860, 40:607-658.

Hertz, Heinrich

- 1894 *Über die Prinzipien der Mechanik*, Leipzig: Ambrosius Barth, 1894. Nachdruck der Einleitung in R.Rompe u. H.-J.Treder, (Hrsg.), *Zur Grundlegung der theoretischen Physik. Beiträge von H.v.Helmholtz und H.Hertz*. Berlin: Akademie-Verlag 1984.

Hofmann, August Wilhelm

- 1888 "Gustav Magnus", nach einem Vortrag vom 14.12.1870 in der Chemischen Gesellschaft zu Berlin, in: *Zur Erinnerung an vorangegangene Freunde. Gesammelte Gedächtnisreden*, Braunschweig: Vieweg 1888, Band 1, 43-194.

Holtzmann, C.

- 1851 "Ueber die bewegende Kraft der Wärme", *Annalen der Physik*, 1851, 82:445-452.

Hoppe, Reinhold

- 1856 "Ueber das Wesen der Wärme als Äquivalent der Arbeit", *Annalen der Physik*, 1856, 97:30-34.
- 1857 "Bemerkung zu den Aufsätzen Bd.98, S.77 und Bd.99, S.562, und Erwiderung auf die Notiz Bd.98, S.173, betreffend die Wärmetheorie", *Annalen der Physik*, 1857, 101:143-147.
- 1858 "Ueber Bewegung und Beschaffenheit der Atome", *Annalen der Physik*, 1858, 104:279-292.
- 1860 "Erwiderung auf einen Artikel von Clausius, nebst einer Bemerkung zur Erklärung der Erdwärme", *Annalen der Physik*, 1860, 110:598-612.

Jäger, Gustav

- 1906a "Die kinetische Theorie der Gase", in A.Winkelmann, *Handbuch der Physik*, Band 3: Wärme, 2.Auflage Leipzig 1906, 687-767.
- 1906b *Die Fortschritte der kinetischen Gastheorie*, Braunschweig: Vieweg 1906.

Jensen, H.Smith, P.Wölfle, K.Nagai u. T.M.Bisgaard

- 1980 "Boundary Effects in Fluid Flow. Application to Quantum Fluids", *Journal Low Temp. Phys.*, 1980, 41:473-519.

Jochmann, Emil

- 1859a *Beiträge zur Theorie der Gase*, Berlin 1859.
- 1859b "Ueber die Molecularconstitution der Gase", *Annalen der Physik*, 1859, 108:153-162.

Joule, James Prescott

- 1848 "Some Remarks on Heat and the Constitution of Elastic Fluids", *Mem. Manchester Lit. Phil. Soc.*, 1848, 9:107-114; mit geringfügigen Ergänzungen nochmals abgedruckt in: *Philosophical Magazine*, 1857, 14:211-216.

Karsten, Gustav

- 1851 *Lehrgang der mechanischen Naturlehre für höhere Unterrichtsanstalten*, Kiel 1851.

Kirchhoff, Gustav

- 1876 *Vorlesungen über mathematische Physik*, Leipzig: Teubner 1876.

Kistner, Adolf

- 1909 "Meyer, Oskar Emil", *Biographisches Jahrbuch und Deutscher Nekrolog*, Band 14, 1909, 157-160.
- 1913 "Aus dem Briefwechsel des Physikers Oskar Emil Meyer und des Chemikers Lothar Meyer", *Archiv für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik*, 1913, 6:207-215.

Koenigsberger, Leo

- 1902 *Hermann von Helmholtz*, 3 Bände, Braunschweig: Vieweg 1902-1903.
- 1919 *Mein Leben*, Heidelberg: Winters 1919.

Kohlrausch, Friedrich

- 1868 "Eine Bestimmung der specifischen Wärme der Luft bei constantem Volumen mit dem Metallbarometer", *Annalen der Physik*, 1868, 136:618-625.
- 1968 *Praktische Physik*, 22. Auflage Stuttgart: Teubner 1968.

König, Walter

- 1924 "Georg Hermann Quinckes Leben und Schaffen", *Die Naturwissenschaften*, 1924, 12:621-627.

Krönig, August

- 1845 *De acidi chromici salibus crystallibus*, Dissertation Berolina 1845.
- 1851 *Journal für die Physik und physikalische Chemie des Auslands*, Berlin 1851.
- 1856 "Grundzüge einer Theorie der Gase", *Annalen der Physik*, 1856, 99:315-322.

- 1874 *Ueber das Dasein Gottes und das Glück des Menschen, materialistisch-erfahrungsphilosophische Studien, insbesondere über die Gottesfrage und den Darwinismus, über den Selbstbeglückungstrieb als Fundament der Lebensweisheit und praktischen Moral und über die Hauptlehren Kant's und Schopenhauer's*, Berlin 1874.

Kundt, August

- 1863a "Ueber die Untersuchung planparalleler Platten", *Annalen der Physik*, 1863, 120:46-54.
- 1863b "Untersuchungen über Augenmaass und optische Täuschungen", *Annalen der Physik*, 1863, 120:118-158.
- 1864a *De Lumine Depolarisato*, Dissertation Berolina 1864. Dies wurde auch in deutscher Sprache publiziert: "Ueber Depolarisation", *Annalen der Physik*, 1864, 123:385-418.
- 1864b "Ueber die Doppelbrechung des Lichts in tönenden Stäben", *Annalen der Physik*, 1864, 123:541-558.
- 1865a "Ueber eine besondere Art der Bewegung elastischer Körper auf tönenden Röhren und Stäben", *Annalen der Physik*, 1865, 126:513-527.
- 1865b "Ueber die Mittheilung des Tones longitudinal schwingender Stäbe und Röhren an die umgebende Luft", *Monatsbericht der Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1865, 234-255.
- 1866a "Ueber eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen", *Annalen der Physik*, 1866, 127:497-523.
- 1866b "Bemerkung über den Durchgang der Funken des Inductoriums durch die Flamme", *Annalen der Physik*, 1866, 128:159-160.
- 1866c "Ueber die Erzeugung von Klangfiguren in Orgelpfeifen, und über die Wirkung tönender Luftsäulen auf Flammen", *Annalen der Physik*, 1866, 128:337-355 u. 496.
- 1866d "Beobachtung der Schwingungsform tönender Platten durch Spiegelung", *Annalen der Physik*, 1866, 128:610-613.
- 1866e "Ueber einige Arten der Erzeugung von Tönen durch Flammen", *Annalen der Physik*, 1866, 128:614-621.
- 1868 "Untersuchungen über die Schallgeschwindigkeit der Luft in Röhren", *Annalen der Physik*, 1868, 135:337-372 u. 527-561.
- 1871 "Ueber die anomale Dispersion der Körper mit Oberflächenfarben", *Annalen der Physik*, 1871, 142:163-171.
- 1872 "Ueber anomale Dispersion", *Annalen der Physik*, 1872, 145:67-80 u. 164-166.
- 1876 "Apparat zur Demonstration der Reibung in einem sehr verdünnten Gas (Vakuum)", *Annalen der Physik*, 1876, 158:568-572 u. 660.

- 1877 "Apparat zur Demonstration des verschiedenen Wärmeleitungsvermögens der Gase", *Annalen der Physik*, 1877, 2:384-386.
 - 1889 "Antrittsrede vor der Akademie der Wissenschaften am 4.7.1889", abgedruckt in: (Kirsten u. Körber 1975), Band 2, 159-161.
 - 1893 "Physik", in W.Lexis (Hrsg.), *Die Deutschen Universitäten*, 2 Bände, Berlin: Asher, 1893, Band 2, 25-35.
- Kundt, A. u. Warburg, E.
- 1875 "Ueber Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase", *Monatsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1875, 160-173. In englischer Übersetzung: *Philosophical Magazine*, 1875, 50:53-62. Die ausführliche Fassung: *Annalen der Physik*, 1875, 155:337-366, 525-550 (datiert mit April 1875) u. 156:177-211.
 - 1876 "Ueber die spezifische Wärme des Quecksilbergases", *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 1875, 8:945-948 (datiert mit dem 9.7.1875); *Annalen der Physik*, 1876, 157:353-369.
- Ladenburg, Rudolf
- 1907 "Über die innere Reibung zäher Flüssigkeiten und ihre Abhängigkeit vom Druck", *Annalen der Physik*, 1907, 22:287-309.
 - 1908 "Über den Einfluß der Reibung auf die Schwingungen einer mit Flüssigkeit gefüllten Kugel", *Annalen der Physik*, 1908, 27:157-185.
- Lehnebach, A.
- 1874 "Bestimmung des Emissionsvermögens schwarzer Körper mittelst der Eiscalorimetrischen Methode", *Annalen der Physik* 1874, 151:96-108.
- Lorentz, Hendrik Antoon
- 1878 "Molecular Theories in Physics", Inauguralansprache vom 25.1.1878 in Leiden, *Collected Papers*, 9 Bände, The Hague: Marlinus Nijhoff, 1939, Band 9, 26-49.
- Loschmidt, Joseph
- 1876 "Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1876, 73:128-142 u. 366-372; 1877, 75:287-298; 76:209-225.
- Mach, Ernst
- 1872 *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Energie*, Prag: Colve 1872.

- 1883 *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig: Brockhaus 1883.
- 1896 *Die Principien der Wärmelehre*, Leipzig: Ambrosius Barth 1896.
- Magnus, Gustav
- 1825 "Ueber die Eigenschaft metallischer Pulver, sich bei der gewöhnlichen Temperatur von selbst in der atmosphärischen Luft zu entzünden", *Annalen der Physik*, 1825, 3:81-88.
- 1827 *De tellurio*, Dissertation Berolina 1827.
- 1833a "Ueber die Weinschwefelsäure, ihren Einfluss auf die Aetherbildung, und über zwei neue Säuren ähnlicher Zusammensetzung", *Annalen der Physik* 1833, 27:367-387.
- 1833b "Ueber eine neue Verbindung des Jods mit Sauerstoff: die Ueberjodsäure", (gemeinsam mit C.F.Ammermüller) *Annalen der Physik* 1833, 28:514-524.
- 1837 "Ueber die im Blute enthaltenen Gase, Sauerstoff, Stickstoff und Kohlensäure", *Annalen der Physik* 1837, 41:583-606.
- 1841 "Ueber die Ausdehnung der Gase durch die Wärme", *Annalen der Physik*, 1841, 54:601-603; 55:1-26. Mit Arbeiten anderer Autoren in: W.Ostwald (Hrsg.), *Das Ausdehnungsgesetz der Gase. Abhandlungen von Gay-Lussac, Dalton, Dulong und Petit, Rudberg, Magnus, Regnault*. Ostwalds Klassiker Nr.44, Leipzig: Engelmann 1894.
- 1850 "Ueber die Bewegung der Flüssigkeiten", *Annalen der Physik*, 1850, 80:1-36.
- 1852 "Ueber die Abweichung der Geschosse", *Annalen der Physik*, 1853, 88:1-28. Dies erschien außerdem als separate Broschüre: 1.Auflage, Berlin 1852 und 2.Auflage, Berlin 1860.
- 1860 "Ueber die Verbreitung der Wärme in Gasen", *Annalen der Physik* 1861, 112:497-548. (Gelesen in der Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 30.7.1860 und 7.2.1861, laut Angabe auf der Titelseite.)
- 1868 "Ueber die Polarisirung der Wärme von 100°C und die Bewegung bei der Wärmeleitung", *Annalen der Physik*, 1868, 134:45-64.
- 1900 *Aus Jac. Berzelius und Gustav Magnus Briefwechsel in den Jahren 1828-1847*, E.Hjelt (Hrsg.), Braunschweig: Vieweg, 1900.

Maxwell, James Clerk

- 1859 "On the Dynamical Theory of Gases", *Report of the 29th Meeting of the British Association for the Advancement of Science*, Notices and Abstracts, Aberdeen September 1859, 9.

- 1860a "On the Results of Bernoulli's Theory of Gases as Applied to Their Internal Friction, Their Diffusion, and Their Conductivity for Heat", *Report of the 30th Meeting of the British Association for the Advancement of Science*, Notices and Abstracts, Oxford June and July 1860, 15-16.
- 1860b "Illustrations of the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine*, 1860, 19:19-32; 20:21-37; *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, 2 Bände, Cambridge 1890, Nachdruck Paris: Hermann 1927, Band 1, 377-409.
- 1864 "On the Conduction of Heat in Gases", Cambridge University Library, Maxwell manuscripts; abgedruckt in: (Garber, Brush u. Everitt 1986), 339-349.
- 1865 "The Bakerian Lecture.- On the Viscosity or Internal Friction of Air and other Gases." (Eingegangen am 23.11.1865, gelesen am 8.2.1866. Dazu ein Postscriptum vom 7.12.1865). *The Scientific Papers*, Band 2, 1-25.
- 1866 "On the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine*, 1866, 32:390-393; 1868, 35:129-145 u. 185-217. *The Scientific Papers*, Band 2, 26-78.
- 1875 "On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies", *Nature*, 1875, 357-359 u. 374-377; *Journal of the Chemical Society*, 1875, 13:493-508; *The Scientific Papers*, Band 2, 418-438.
- Mayer, Julius Robert
- 1842 *Die Mechanik der Wärme*, (Zwei Veröffentlichungen von 1842 und 1845), A.v.Oettingen (Hrsg.), Ostwalds Klassiker Nr.180, Leipzig: Engelmann 1911.
- Meyer, Oskar Emil
- 1860 *De Mutua Duorum Fluidorum Frictione*, Dissertation Regimonti 1860.
- 1861a "Ueber die Reibung der Flüssigkeiten", *Annalen der Physik*, 1861, 113:55-86, 193-238, 383-425.
- 1861b "Ueber die Reibung der Flüssigkeiten", *Journal für reine und angewandte Mathematik*, 1861, 59:229-303.
- 1863 "Ueber die innere Reibung der Atmosphärischen Luft", *Amtlicher Bericht über die 38. Naturforscherversammlung in Stettin 1863*, Stettin 1864, 141-144.
- 1865 "Ueber die innere Reibung der Gase. Erste Abhandlung. Ueber den Einfluß der Luft auf Pendelschwingungen", *Annalen der Physik*, 1865, 125:177-209, 401-420, 564-599. Datiert mit April 1865.
- 1866 "Ueber die Reibung der Gase. Zweite Abhandlung. Ueber die Strömung der Gase durch Capillarröhren." *Annalen der Physik*, 1866, 127:253-281, 353-382. Datiert mit dem 24.11.1865.

- 1871 "Ueber die innere Reibung der Gase. Dritte Abhandlung. Ueber Maxwell's Methode zur Bestimmung der Luftreibung." *Annalen der Physik*, 1871, 143:14-26. Datirt mit dem 5.4.1871.
- 1873a "Ueber die innere Reibung der Gase. Vierte Abhandlung. Die Gültigkeit des Poiseuille'schen Gesetzes für die Transpiration der Gase." *Annalen der Physik*, 1873, 148:1-44. Datirt mit August 1872.
- 1873b "Ueber die innere Reibung der Gase. Fünfte Abhandlung. Der Einfluß der Temperatur auf die Reibung." *Annalen der Physik*, 1873, 148:203-236. Datirt mit dem 9.9.1872.
- 1877 *Die kinetische Theorie der Gase*, Breslau: Maruschke und Behrendt 1877, 2.Auflage Breslau 1899.
- Müller, Johannes
- 1879 *Lehrbuch der Physik und Meteorologie*, Band 2, 2.Abteilung: *Von der Wärme*, 8.Auflage Braunschweig: Vieweg 1879.
- Narr, Friedrich
- 1871 "Ueber die Erkaltung und Wärmeleitung in Gasen", *Annalen der Physik*, 1871, 142:123-158.
- Natanson, Ladislaus
- 1889 "Ueber die Wärmeerscheinungen bei der Ausdehnung der Gase", *Annalen der Physik*, 1889, 37:341-352.
- Ostwald, Wilhelm
- 1927 *Lebenslinien*, 3 Bände, Berlin: KLASING 1926-1927.
- Paschen, Friedrich
- 1932 "Gedächtnisrede auf Emil Warburg, gehalten in der Akademie der Wissenschaften am 30.6.1932", abgedruckt in: (Kirsten u. Körber 1975), Band 2, 185-191.
- Planck, Max
- 1887 *Das Prinzip von der Erhaltung der Energie*, Leipzig: Teubner 1887.
- 1891 "Allgemeines zur neueren Entwicklung der Wärmetheorie", *Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Halle 1891*, Leipzig 1891, 55-61.
- 1895 "Wahlvorschlag für Emil Warburg vom 30.5.1895", abgedruckt in: (Kirsten u. Körber 1975), Band 1, 131-132.
- 1896 "Gegen die neuere Energetik", *Annalen der Physik*, 1896, 57:72-78.
- 1946 "Erinnerungen aus alten Zeiten", *Die Naturwissenschaften*, 1946, 33:230-235.

Poincaré, Henri

- 1890 "Sur le problème des trois corps et les équations de dynamique", *Acta Mathematica*, 1890, 13:1-270.

Poiseuille, J.L.M.

- 1840 "Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très-petits diamètres", vorgelegt der Académie Royale des Sciences de l'Institut de France in den Sitzungen vom 14.12., 28.12.1840 und 11.1.1841. *Comptes Rendus*, 1841, 11:961-967 u. 1041-1048, 12:112-115. Erschien außerdem als Bericht einer aus Arago, Babinet, Piobert und Regnault bestehenden Kommission: "Experimentelle Untersuchungen über die Bewegung der Flüssigkeiten in Röhren von sehr kleinen Durchmessern", *Annalen der Physik*, 1843, 58:424-448.

Puluj, Johann

- 1877 "Ueber die Abhängigkeit der Reibung der Gase von der Temperatur", *Annalen der Physik*, 1877, 1:296-310.

Puschl, Karl

- 1862 "Über den Wärmezustand der Gase", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1862, 45:357-384.

Redtenbacher, F.

- 1857 *Das Dynamiden-System. Grundzüge einer mechanischen Physik*, Mannheim 1857.

Röntgen, Wilhelm Conrad

- 1870 "Ueber die Bestimmung des Verhältnisses der specifischen Wärmen der Luft", *Annalen der Physik*, 1870, 141:552-559.
- 1873 "Bestimmung des Verhältnisses der specifischen Wärmen bei constantem Druck zu derjenigen bei constantem Volumen für einige Gase", *Annalen der Physik*, 1873, 148:580-624.

Rose, Heinrich

- 1839 "Wahlvorschlag für Gustav Magnus vom 22.4.1839", abgedruckt in: (Kirsten u. Körber 1975), Band 2, 55.

Rubens, Heinrich

- 1910 "Das physikalische Institut", in M.Lenz, *Geschichte der Königlichen Friedrich Wilhelm Universität zu Berlin*, 1910, Band 3, 278-296.

Schönbein, C.F.

- 1858 "On the various conditions of oxygen", *Philosophical Magazine*, 1858, 15:24-27.

Schiller, L.

- 1933 Hrsq.: *Drei Klassiker der Strömungslehre: Hagen Poiseuille Hagenbach, Ostwalds Klassiker Nr.237, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1933.*

Schwalbe, G.

- 1903 "August Kundt. Leben und Wirksamkeit." Einleitung zu Kundts posthum von K.Scheel herausgegebenen *Vorlesungen über Experimentalphysik*, Braunschweig: Vieweg 1903.

Smoluchowski, Marian v.

- 1894 "Akustische Untersuchungen über die Elastizität weicher Körper", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1894, 103:739-772.
- 1898a "Ueber die Wärmeleitung in verdünnten Gasen", *Annalen der Physik*, 1898, 64:101-130. Eingereicht am 28.11.1897.
- 1898b "Über den Temperatursprung bei Wärmeleitung in Gasen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1898, 107:304-329.
- 1898c "On Conduction of Heat by Rarefied Gases", *Philosophical Magazine*, 1898, 46:192-206.
- 1899a "Neuere Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen", *Österreichische Chemiker-Zeitung*, 1899, 2:385-392.
- 1899b "Weitere Studien über den Temperatursprung bei Wärmeleitung in Gasen", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1899, 108:5-23.

Sommerfeld, Arnold

- 1917 "Zum Andenken an Marian von Smoluchowski", *Physikalische Zeitschrift*, 1917, 18:533-539.

Stefan, Josef

- 1862 "Über die Bewegung flüssiger Körper", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1862, 46:8-31, 495-519.
- 1863 "Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in gasförmigen Körpern", *Annalen der Physik*, 1863, 118:494-496.
- 1872 "Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen. Erste Abhandlung." *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1872, 65:45-69.
- 1876 "Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen. Zweite Abhandlung. Relative Bestimmungen der Wärmeleitungsvermögen verschiedener Gase", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1876, 72:69-101.
- 1879 "Über die Beziehung der Wärmestrahlung und der Temperatur", *Sitzungsberichte der Wiener Akademie*, 1879, 79:391-428.

Stokes, Georg Gabriel

- 1845 "On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids", (gelesen am 14.4.1845 vor der Cambridge Philosophical Society, laut Angabe auf der Titelseite), *Mathematical and Physical Papers*, 5 Bände, Nachdruck London und New York: Johnson 1966, Band 1, 75-129.
- 1850 "On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums", (gelesen am 9.12.1850 vor der Cambridge Philosophical Society, laut Angabe auf der Titelseite), *Mathematical and Physical Papers*, Band 3, 1-141.
- 1907 *Memoir and Scientific Correspondence of the Late Sir George Gabriel Stokes*, J.Larmor (Hrsg.), Cambridge: Cambridge University Press 1907.

Verdet, E.

- 1857 "Principe d'une nouvelle théorie des gaz", *Annales de Chimie*, 1857, 50:491-497.

Warburg, Emil

- 1867 *Systematis Corporum Vibrantium*, Dissertation Berolina 1867.
- 1869a "Ueber tönende Systeme", *Annalen der Physik*, 1869, 136:89-102.
- 1869b "Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in weichen Körpern", *Annalen der Physik*, 1869, 136:285-295.
- 1869c "Ueber die Erwärmung fester Körper durch das Tönen", *Annalen der Physik* 1869, 137:632-640.
- 1870a "Ueber die Dämpfung der Töne fester Körper durch innere Widerstände", *Annalen der Physik* 1870, 139:89-104.
- 1870b "Ueber den Einfluss tönender Schwingungen auf den Magnetismus des Eisens", *Annalen der Physik*, 1870, 139:499-502.
- 1870c "Ueber den Ausfluss des Quecksilbers aus gläsernen Capillarröhren", *Annalen der Physik*, 1870, 140:367-379. Datiert mit dem 5.4.1870.
- 1876 "Ueber die Gleitung an Glaswänden", *Annalen der Physik*, 1876, 159:399-415. Datiert mit dem 9.7.1876.
- 1893 *Lehrbuch der Experimentalphysik für Studierende*, 1.Auflage Freiburg und Leipzig: Mohr 1893.
- 1896 "Antrittsrede vor der Akademie der Wissenschaften am 2.7.1896", abgedruckt in: (Kirsten u. Körber 1975), Band 2, 183-184.
- 1900 *Ueber die kinetische Theorie der Gase*, Berlin 1900.

- 1922 *Lehrbuch der Experimentalphysik für Studierende*, 19. und 20. Auflage Dresden und Leipzig: Steinkopff 1922.
- 1924 *Über Wärmeleitung und andere ausgleichende Vorgänge*, Berlin: Springer 1924.
- 1925a "Zur Geschichte der Physikalischen Gesellschaft", *Die Naturwissenschaften*, 1925, 13:35-39.
- 1925b "Zur Erinnerung an Gustav Kirchhoff", *Die Naturwissenschaften*, 1925, 13:205-212.

Wiedemann, Gustav

- 1856 "Ueber die Bewegung der Flüssigkeiten im Kreise der geschlossenen galvanischen Säule und ihre Beziehungen zur Elektrolyse", *Annalen der Physik*, 1856, 99:177-233.
- 1859 "Ueber die Torsion und die Beziehungen derselben zum Magnetismus", *Annalen der Physik*, 1859, 106:161-201.

Wien, Wilhelm

- 1900 *Lehrbuch der Hydrodynamik*, Leipzig: Hirzel 1900.
- 1910 "Friedrich Kohlrausch", *Annalen der Physik*, 1910, 31:449-450.

Wilhelmy, Ludwig

- 1851 *Der Versuch einer mathematisch-physikalischen Wärme-Theorie*, Heidelberg 1851.

Winkelmann, Adolph

- 1891 Hrsg.: *Handbuch der Physik*, 3 Bände, Breslau: Trewendt 1891-1895.
- 1903 Hrsg.: *Handbuch der Physik*, 6 Bände, 2. Auflage Leipzig: Ambrosius Barth 1903-1909.
- 1906 "Spezifische Wärme der Gase", in Winkelmann, *Handbuch der Physik*, Band 3: Wärme, 2. Auflage Leipzig: Ambrosius Barth 1906, 208-240.

Witzschel, B.

- 1857 "Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. Nach Clausius und Krönig", *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 1857, 2:170-187.

Wöhler, Friedrich

- 1875 "Jugend-Erinnerungen eines Chemikers", *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft zu Berlin*, 1875, 8:838-852.

Zehnder, Ludwig

1935 W.C.Röntgen. *Briefe an L.Zehnder*, Zürich: Rascher & Zie
1935.

Zermelo, Ernst

1896 "Ueber einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärme-
lehre", *Annalen der Physik*, 1896, 57:485-494.

1897 "Über mechanische Erklärungen irreversibler Vorgänge. Eine
Antwort auf Hrn. Boltzmanns 'Entgegnung'", *Annalen der
Physik*, 1897, 59:793-801.

Sekundärliteratur

Aigner, A.

- 1985 *Das Fach der Mathematik an der Universität Graz*, Graz:
Akademische Drucks- und Verlagsanstalt 1985.

Bernstein, H.

- 1963 "J.Clerk Maxwell on the History of the Kinetic Theory of
Gases, 1871", *Isis*, 1963, 54:206-216.

Biermann, K.

- 1973 *Die Mathematik und ihre Dozenten an der Berliner
Universität 1810-1920*, Berlin: Akademie-Verlag 1973.

Blackmore, J.

- 1982 "Boltzmann's Concessions to Mach's Philosophy of Science",
in (Sexl u. Blackmore 1982), 155-190.

Borscheid, P.

- 1976 *Naturwissenschaft, Staat und Industrie in Baden*, Stuttgart:
Klett 1976.

Brush, S.G.

- 1970 *Kinetische Theorie*. Band 1: *Die Natur der Gase und der
Wärme*. Band 2: *Irreversible Prozesse*. Braunschweig: Vieweg
1970.

- 1976 *The Kind of Motion We Call Heat: A History of the Kinetic
Theory of Gases in the 19th Century*. Band 1: *Physics and
Atomists*. Band 2: *Statistical Physics and Irreversible
Processes*. Amsterdam und New York: North-Holland 1976.

- 1983 *Statistical Physics and the Atomic Theory of Matter. From
Boyle and Newton to Landau and Onsager*. Princeton:
Princeton University Press 1983.

Brüche, E.

- 1961 "Aus der Vergangenheit der Physikalischen Gesellschaften:
V. Die alten Gesellschaftsschriften", *Physikalische
Blätter*, 1961, 17:255-232.

Burr, A.C.

- 1934 "Notes on the History of the Experimental Determination of
the Thermal Conductivity of Gases", *Isis*, 1934, 21:169-186.

Burstyn, H.

- 1970 "Buys-Ballot", *Dictionary of Scientific Biography*,
New York 1970, 2:628.

Butzer, P. u. Féher, F.

1981 Hrsg.: E.B.Christoffel. *The influence of his work on mathematics and the physical sciences*. Basel: Birkhäuser 1981.

Cahan, D.

1980 *The Physikalisch-Technische Reichsanstalt*, Dissertation Baltimore 1980.

1985 "The institutional revolution in German physics, 1865-1914", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1985, 15:1-65.

Campbell, L. u. Garnett, W.

1882 *The Life of James Clerk Maxwell*, London 1882.

Craig, J.E.

1973 *A mission for German Learning: The University of Strasbourg*, Dissertation Stanford 1973.

Daub, E.

1970 "Waterston, Rankine, and Clausius on the Kinetic Theory of Gases", *Isis*, 1970, 61:105-106.

1971 "Waterston's Influence on Krönig's Kinetic Theory of Gases", *Isis*, 1971, 62:512-515.

Elkana, Y.

1986 *Anthropologie der Erkenntnis*, Frankfurt: Suhrkamp 1986.

El'yashevich, M.A. u. Prot'ko, T.S.

1981 "Maxwell's contribution to the development of molecular physics and statistical methods", *Sov.Phys.Usp.*, 1981, 24:876-903.

Erman, W.

1927 *Paul Erman. Ein Berliner Gelehrtenleben 1764-1851*, Berlin: Verlag des Vereins für die Geschichte Berlins 1927.

Everitt, C.W.F.

1974 *James Clerk Maxwell*, New York: Charles Scribner's Sons 1974.

Fox, R.

1971 *The Caloric Theory of Gases from Lavoisier to Regnault*, Oxford: Clarendon Press 1971.

Gagliardi, E.

1938 *Die Universität Zürich und ihre Vertreter 1833-1933*,
Zürich 1938.

Garber, E.

1970 "Clausius and Maxwell's Kinetic Theory of Gases", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1970, 2:299-319.

1974 "Rudolph Clausius' Work in Meteorologic Optics", *RETE*,
1974, 2:323-337.

1978 "Molecular Science in Late-Nineteenth-Century Britain",
Historical Studies in the Physical Sciences, 1978,
9:265-297.

Garber, E. Brush, S.G. u. Everitt, C.W.F.

1986 *Maxwell on Molecules and Gases*, Cambridge Mass.: MIT Press
1986.

Hermann, A.

1984 *Planck*, Reinbek: Rowohlt 1984.

Hiebert, E.

1971 "The Energetics Controversy and the New Thermodynamics", in
D.H.D.Roller, *Perspectives in the History of Science and
Technology*, Norman: University of Oklahoma Press 1971,
67-86.

Höflechner, W.

1982 "Ludwig Boltzmann. Sein akademischer Werdegang in
Österreich. Dargestellt nach archivalischen Materialien."
*Mitteilungen der Österreichischen Gesellschaft für
Geschichte der Naturwissenschaften*, 1982, 2:43-62.

Höflechner, W. u. Hohenester, A.

1985 *Ludwig Boltzmann*, Ausstellungskatalog Deutsches Museum
München 1985.

Hopley, I.B.

1956 *Clerk Maxwell's contributions to physics*, Dissertation
University of London 1956.

Hoyer, U.

1974 "Carnots Réflexions - zur Entstehung der Thermodynamik vor
150 Jahren", *Physikalische Blätter*, 1974, 30:385-393.

Jungnickel, C. u. McCormmach, R.

1986 *Intellectual Mastery of Nature*, Band 1: *The Torch of
Mathematics 1800-1870*, Band 2: *The now mighty Theoretical
Physics*, Chicago: The University of Chicago Press 1986.

Kaiser, W.

- 1982 "Boltzmanns Mechanische Darstellung von Thermodynamik und Elektrodynamik", in (Sexl u. Blackmore 1982), 207-230.

Kangro, H.

- 1953 *Die Geschichte der Physik an der Universität Freiburg, Staatsexamensarbeit Freiburg 1953.*

Kauffmann, G.

- 1974 "Magnus", *Dictionary of Scientific Biography*, New York, 1974, 9:18-19.

Kirsten, C. u. Körber, H.-G.

- 1975 Hrsg.: *Physiker über Physiker*, Berlin: Akademie-Verlag, Band 1: 1975, Band 2: 1979.

Klaus, A.

- 1904 *Über die Entwicklung der kinetischen Gastheorie und ihre Bedeutung für die moderne Physik*, Dissertation Freiburg 1904.

Kleinert, A.

- 1982 "Akademische Disputierschriften aus der Bibliothek Schimank", *Bibliothekswissenschaft Musikbibliothek Soziale Bibliotheksarbeit*, Wiesbaden: Otto Harrassowitz 1982, 77-86.

Knobloch, E.

- 1981 "Die Berliner Gewerbeakademie und ihre Mathematiker", in (Butzer u. Féher 1981), 42-51.

Knus, M.-A.

- 1981 "Christoffel und die Mathematik an der polytechnischen Schule Zürich", in (Butzer u. Féher 1981), 33-41.

Kuhn, T.

- 1958 "The Caloric Theory of Adiabatic Compression", *Isis*, 1958, 49:132-140.

- 1977 "Die Erhaltung der Energie als Beispiel gleichzeitiger Entdeckung", *Die Entstehung des Neuen*, Frankfurt: Suhrkamp 1977, 125-168.

Landau, L.D. u. Lifshitz, E.M.

- 1981 *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Band VI: *Hydrodynamik*, 4.Auflage, Berlin: Akademie-Verlag 1981.

McCormmach, R.

1984 *Nachtgedanken eines klassischen Physikers*, Frankfurt: Insel-Verlag 1984.

Mehrtens, H. Bos, H. u. Schneider, I.

1981 Hrsg.: *Social History of Nineteenth Century Mathematics*, Boston Basel Stuttgart: Birkhäuser 1981.

Mendoza, E.

1982 "The kinetic theory of matter", *Arch.Int.Hist.Sci*, 1982, 32:184-220.

Meyenn, K.v.

1978a "Die Reorganisation der Straßburger Universität im Jahre 1872 und Christoffels Berufung auf den mathematischen Lehrstuhl", *Heimatblätter des Kreises Aachen*, 1978, 34/35:68-74.

1978b "Christoffel an der Kaiser-Wilhelms-Universität in Straßburg", *Heimatblätter des Kreises Aachen*, 1978, 34/35:75-79.

1981 "Dispersion und mechanische Athertheorien im 19.Jahr hundert", in (Butzer u. Féher 1981), 680-703.

1982a "Engpässe in der Atomtheorie des frühen 19.Jahrhunderts", in (Schönbeck 1982), 35-55.

1982b "Boltzmann als Kritiker und Rezensent", in (Sexl u. Blackmore 1982), 97-127.

Møller Pederson, K.

1975 "Poiseuille", *Dictionary of Scientific Biography*, New York 1975, 11:62-64.

Nitske, W.

1971 *The Life of Wilhelm Conrad Röntgen: Discoverer of the X-ray*, Tucson: The University of Arizona Press 1971.

Oechsli, W.

1905 *Festschrift zum 50jährigen Bestehen 1855-1905*, Zürich 1905.

Olesko, K.

1980 *The Emergence of Theoretical Physics in Germany: Franz Neumann and the Königsberg School of Physics, 1830-1890*, Dissertation Cornell University 1980.

Ostwald, W.

1985 *Zur Geschichte der Wissenschaft*, Ostwalds Klassiker Nr.267, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1985.

Porter, T.

- 1981 "A statistical survey of gases: Maxwell's social physics", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1981, 12:77-116.

Pringsheim, P.

- 1925 "Gustav Magnus", *Die Naturwissenschaften*, 1925, 13:49-52.

Ramser, H.

- 1976 "Warburg", *Dictionary of Scientific Biography*, New York, 1976, 14:170-172.

Rauh, M.

- 1922 *Die Vertreter der Physik an den deutschen Hochschulen im 19. Jahrhundert und ihre Richtungen*, Dissertation Erlangen 1922.

Reindl, M.

- 1965 *Lehre und Forschung in Mathematik und Naturwissenschaften, insbesondere Astronomie, an der Universität Würzburg von der Gründung bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts*, Dissertation Würzburg 1965.

Rompe, R. u. Treder, H.-J.

- 1979 "Die große Zeit der Physik in Berlin", in (Kirsten u. Körber 1979), Band 2, 9-25.

Ronge, G.

- 1955 "Die Züricher Jahre des Physikers Rudolf Clausius", *Gesnerus*, 1955, 12:73-108.

- 1961 "Zur Geschichte der kinetischen Wärmetheorie mit biographischen Notizen zu August Karl Krönig", *Gesnerus*, 1961, 18:45-70.

Rosenberger, F.

- 1890 *Die Geschichte der Physik*, Band III: *Geschichte der Physik in den letzten hundert Jahren*, Braunschweig 1890. Nachdruck Hildesheim: Olms 1965.

Schneider, I.

- 1974 "Clausius' erste Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung im Rahmen der atmosphärischen Lichtstreuung", *Archive for History of Exact Sciences*, 1974, 14:143-158.

- 1975 "Rudolph Clausius' Beitrag zur Einführung wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden in die Physik der Gase nach 1856", *Archive for History of Exact Sciences*, 1975, 14:237-261.

Schönbeck, C.

- 1982 Hrsg.: *Atomvorstellungen im 19. Jahrhundert*, Paderborn: Schöningh 1982.

Schöpf, H.-G.

- 1984a "Das Carnotsche Paradigma und seine erkenntnistheoretischen Implikationen", *Annalen der Physik*, 1984, 41:151-160.
- 1984b "Rudolf Clausius. Ein Versuch, ihn zu verstehen." *Annalen der Physik*, 1984, 41:185-207.

Schubring, G.

- 1981 "The Conception of Pure Mathematics as an Instrument in the Professionalization of Mathematics" in (H.Mehrtens, H.Bos u. I.Schneider 1981), 111-134.
- 1985 Die Erinnerungen von Karl Emil Gruhl (1833-1917) an sein Studium der Mathematik und Physik in Berlin (1853-1856)", *Jahrbuch Oberblicke Mathematik 1985*, Mannheim: Bibliographisches Institut 1985, 143-173.

Sextl, R. u. Blackmore, J.

- 1982 Hrsg.: *Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe*, Band 8: *Ausgewählte Abhandlungen*, Graz: Akademische Druck- und Verlagsanstalt 1982.

Stichweh, R.

- 1984 *Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen. Physik in Deutschland 1740-1890*. Frankfurt: Suhrkamp 1984.

Teske, A.

- 1955 *Marian von Smoluchowski Leben und Werk*, Wroclaw 1977, deutsche Übersetzung des polnischen Originals von 1955.
- 1969 "Einstein und Smoluchowski", *Sudhoffs Archiv*, 1969, 53:292-305.

Treder, H.-J.

- 1975 "Zur Geschichte der Physik an der Berliner Akademie von 1870 bis 1930", in (Kirsten u. Körber 1975), Band 1, 11-48.

Truesdell, C.

- 1975 "Early Kinetic Theories of Gases", *Archive for History of Exact Sciences*, 1975, 15:1-66.
- 1980 *The Tragicomical History of Thermodynamics 1822-1854*, New York, Heidelberg, Berlin: Springer 1980.

Wollmershäuser, F.R.

- 1981 "Das mathematische Seminar an der Universität Strassburg 1872-1900", in (Butzer u. Féher 1981), 52-70.

L E B E N S L A U F

geboren am

26. Januar 1952 in Berlin

Schule

1958 - 1964

Grundschule in Berlin-Wilmersdorf

1964 - 1971

Friedrich-Ebert-Gymnasium in Berlin-Wilmersdorf

1971

Abitur ebd.

Universität

1971 - 1973

Studium der Physik an der TU Berlin

1973

Vordiplomprüfung ebd. "mit Auszeichnung"

1973 - 1974

**Studium der Physik und Astronomie an der
Universität Hamburg**

1974 - 1979

Studium der Physik an der FU Berlin

1979

Diplomprüfung ebd. mit der Note "sehr gut"

Berufstätigkeit

1.10.1977 bis 31.3.1980

**studentischer Tutor im Fachbereich Physik
an der FU Berlin**

1. 8.1980 bis 31.7.1983

**Assistent am Lehrstuhl III für
theoretische Physik der Universität Bayreuth**

1. 8.1983 bis 30.9.1986

**Mitarbeiter in einem Entwicklungslabor
des Unternehmensbereichs Datentechnik bei
der Fa. Siemens in München**

seit 1.1.1987

**wissenschaftlicher Mitarbeiter des DFG-Projekts
"Geschichte der Physik verdünnter Gase"
bei Prof. I. Schneider
am Institut für Geschichte der Naturwissenschaften
der Universität München**

